

Trent'anni di Prevenzione e Protezione dagli Agenti Fisici

Atti a cura di:

O.Nicolini, S.Goldoni, P.Nataletti, A.Peretti

Modena, 27 maggio 2015





CONSIDERAZIONI SULLE CRITICITÀ RISCONTRATE IN VIGILANZA NELLE VALUTAZIONI DEL RISCHIO RUMORE E NEI COMPORTAMENTI DI PREVENZIONE E PROTEZIONE AZIENDALI

Omar Nicolini

Azienda USL di Modena, Servizio Prevenzione e Sicurezza Ambienti di Lavoro
Coordinatore del Gruppo di Lavoro Interregionale "Agenti Fisici"

1. INTRODUZIONE

Negli ultimi dieci anni la legislazione per il controllo dei rischi da rumore negli ambienti di lavoro è cambiata per ben due volte.

Sembrano anni luce, ma è solo il 15 dicembre 2006 che, in attuazione del Decreto Legislativo n.195 del 10 aprile 2006, era entrato in vigore Titolo V-bis del DLgs.626/94 dal titolo *"Attuazione della direttiva 2003/10/CE relativa all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici (rumore)"*, sostituendo il quindicenne DLgs.277/91, anch'esso emanato in attuazione di una direttiva comunitaria: la 86/188/CEE.

Il recepimento della medesima Direttiva 2003/10/CE risulta oggi invece inserito nel Decreto Legislativo 9 aprile 2008, n.81, il cosiddetto Testo Unico, pubblicato sul Supplemento Ordinario n. 108/L del n.101, Serie Generale, della Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana e successivamente più volte modificato, in particolare con DLgs.109/2009. E sono quindi già trascorsi altri 7 anni.

Solitamente il succedersi di nuove leggi è indice di un'attenzione al tema della salute e sicurezza superiore al passato e tuttavia, se ci si sofferma a osservare la realtà del mondo produttivo non si ha generalmente questa stessa impressione. A parte rare e virtuose eccezioni, l'onda d'urto della crisi economica e della contestuale sovrabbondanza di mano d'opera ha fatalmente finito con il far passare in secondo piano l'esigenza della tutela della salute in nome della tutela del posto di lavoro.

Pur in una sostanziale continuità di contenuti della legislazione attuale con quelle previgenti, la percezione di chi opera sul campo con l'ottica dell'Organo di Vigilanza, non fa cogliere apprezzabili miglioramenti nella concreta applicazione dei principi di tutela della salute e della sicurezza nel campo dell'acustica.

Anche le problematiche e le domande poste dagli attori della sicurezza (dai datori di lavoro ai RSPP, consulenti, lavoratori, RLS) sono ripetitive, non evolvono e raramente affrontano la radice del problema: la riduzione del rischio mediante concrete misure preventive e protettive.

Trent'anni di dBA

... e adesso sono trent'anni.

E' con un po' di stupore, ma anche con tanta gioia che oggi mi accingo a tentare un bilancio della mia esperienza professionale più gratificante.

Trent'anni sono tanti. In trent'anni si può cogliere quanto sia cambiato il mondo della prevenzione. E anche noi.

Vi propongo alcuni ricordi ben vividi: nel 1985 lavoravo per il SMPIL (Servizio di Medicina Preventiva e Igiene del Lavoro) della "USL 16 di Modena" da 13 anni, facevamo piani mirati di settore, sopralluoghi e i primi verbali ricorrendo al DPR 303/56. Usavo un fonometro analogico e lo usavo anche per i rilievi di vibrazioni, con la pistola a salve e un registratore grafico si facevano i tempi di riverbero, si discuteva se il fattore di scambio q dovesse essere 3 o 5, c'erano i ~~katat~~termometri, avevo i capelli e i baffi neri.

Ricordo che si veniva da anni d'intensa attività sul rischio rumore. Si realizzavano interventi di valutazione del rischio e di identificazione dei possibili interventi di bonifica. Si andava consolidando la struttura degli organismi di prevenzione e vigilanza voluti dalla Legge di Riforma Sanitaria.

Come a Modena, tante strutture pubbliche e private erano in campo su questo rischio in un mondo del lavoro che chiedeva tutele e rivendicava salute.

Mancava un'occasione di confronto, un punto di riferimento, di coagulo per le tante esperienze disponibili.

Questo fu dBA'85, che certamente diede impulso a tante altre idee ed iniziative, come lo stesso Salone Ambiente Lavoro di cui dBA'90 costituì la manifestazione trainante nell'edizione di apertura della fiera. La volontà di evidenziare la praticabilità della prevenzione primaria fu, infatti, uno dei principali obiettivi di dBA, sostenuto già nel 1985 dalla rassegna espositiva delle principali ditte del settore. Non a caso proposi la denominazione dell'iniziativa e la motivai, oltre che per l'evidente assonanza con i decibel ponderati (A), con l'idea di realizzare una mostra-convegno "della Bonifica Acustica".

Su questo progetto, la cui prima edizione si concluse con un successo al di là delle migliori previsioni, ci fu un ampio sostegno dell'Unità Sanitaria Locale modenese, delle istituzioni locali, regionali ed anche nazionali che si coniugò con una straordinaria disponibilità da parte di uomini di prestigio e di tanti volenterosi a portare il loro contributo e razionalizzare le proprie esperienze.

L'idea prese forma anche per l'incontro di persone con esperienze, propensioni e capacità professionali diverse e complementari e tanti sono i soggetti che hanno contribuito a realizzare questo percorso.

Citarli tutti è impossibile e correrei il rischio di dimenticare chi, anche per un solo momento, ha risolto un aspetto pratico permettendo di pianificare meglio l'iniziativa o ha orientato una scelta che si è poi rivelata quella giusta.

Proprio sulla base di questa riflessione qualche giorno addietro ho preso contatto con il Sig. Marcello Arletti, il grafico che nel 1985 disegnò il logo di **dba**.

Non c'eravamo mai visti né parlati; non ci siamo visti, ma solo telefonati.

L'ho ringraziato per la sua opera perché mi è sempre piaciuta e perché tante persone nel tempo mi hanno fatto notare quanto quel logo sia gradevole ed anche simpatico, in linea con i contenuti del Convegno che ha sempre avuto un occhio di riguardo ai temi dell'acustica. L'ho ringraziato e pur scambiandoci poche parole ne ho tratto l'impressione di una persona che realizzò bene il suo mandato perché già affezionata al proprio lavoro, come affezionati al proprio lavoro sono stati e sono ancora tanti colleghi, tanti collaboratori esterni, tanti valenti professionisti, buoni autori di relazioni, buoni collaboratori dei diversi Comitati e Segreterie, tanti dei funzionari e dei decisori di Enti locali, Regioni, Ordini, Associazioni, Istituti e Ministeri che promuovono o hanno promosso o contribuito a dare continuità a questa idea, nonché tanti dei partecipanti che hanno frequentato i vari **dba**.

Ecco, è questo che ha fatto la fortuna di **dba**.

Ed è stato per me un onore e un privilegio grandissimo aver avuto l'opportunità di collaborare con ciascuno di loro e di voi perché ne ho ottenuto un bagaglio umano e tecnico inaspettato e immeritato per i quali non so davvero come ringraziarvi.

Le successive edizioni del Convegno si sono tenute assumendo connotazioni diverse in relazione alle più importanti novità legislative ed alla volontà di affrontare l'insieme dei rischi fisici in un unico contenitore.

Oggi **dba** è un'iniziativa che, promuovendo il confronto multidisciplinare, approfondisce gli argomenti più attuali nell'ambito dei rischi fisici, con contributi tecnico-scientifici sulle novità normative e la loro interpretazione, sugli effetti biologici dei fattori di rischio, sui problemi della sorveglianza sanitaria, delle tecniche di valutazione, misurazione e previsione dei rischi, delle misure di bonifica e di protezione degli esposti, nonché degli aspetti connessi al controllo ed alla vigilanza.

Per citare qualche numero, nelle sue 19 edizioni (8 Convegni **dba** e 11 **dba_{incontri}**) sono state pubblicate un migliaio di relazioni, distribuite oltre 15.000 copie di volumi degli Atti e i Convegni hanno visto la frequenza di oltre 16.000 operatori del mondo della prevenzione.

Questo, probabilmente lo si è capito, è il mio ultimo **dba** che organizzo come dipendente della Azienda USL di Modena.

Mi auguro e vi auguro che l'esperienza possa proseguire, non già per il suo passato, ma per quel tanto che resta ancora da fare per favorire le condizioni per un lavoro più sicuro e più umano.

Omar Nicolini



Chiunque è autorizzato a riprendere parti di questo testo a patto di citare l'articolo con i relativi Autori ed il Volume con i suoi Curatori.

<http://www.ausl.mo.it/dsp/dba>

dBAinfo@ausl.mo.it



Trent'anni di Prevenzione e Protezione dagli Agenti Fisici

**Convegno Nazionale
promosso da:**



In collaborazione con:



**Coordinamento Tecnico Interregionale
della Prevenzione nei luoghi di Lavoro**



Associazione Italiana di Acustica



Ambiente Lavoro

Modena, 27 maggio 2015

**Atti a cura di
O.Nicolini, S.Goldoni, P.Nataletti, A.Peretti**

Comitato Promotore

Massimo Annichiarico
Emanuela Bedeschi
Ester Rotoli

Azienda USL di Modena
Regione Emilia-Romagna
INAIL

Comitato Scientifico

Sara Adda
Fabrizio Benedetti
Massimo Bovenzi
Davide Ferrari
Liliana Frusteri
Adriana Giannini
Luigi Maffei
Luciano Marchiori
Giuseppe Monterastelli
Pietro Nataletti
Omar Nicolini
Alessandro Peretti
Bruno Piccoli
Iole Pinto

ARPA Piemonte
INAIL
Università di Trieste
Azienda USL di Modena
INAIL
Azienda USL di Modena
Associazione Italiana di Acustica
Coord.Tecnico Interreg.Prevenzione luoghi Lavoro
Regione Emilia-Romagna
INAIL
Azienda USL di Modena
Scuola Specializzazione Medicina del Lavoro Padova
Università Cattolica del Sacro Cuore Roma
ASL n°7 Siena

Segreteria Scientifica

O.Nicolini, S.Goldoni, P.Nataletti, A.Peretti

Segreteria Organizzativa

Morena Piumi; formazionesp@ausl.mo.it

Redazione:

Omar Nicolini, Marco Guerrieri

Azienda USL di Modena - Dipartimento di Sanità Pubblica - SPSAL
Via Martiniana, 21 Baggiovara – 41126 Modena

PRESENTAZIONE

Questo volume raccoglie gli Atti del Convegno “**dba 2015** – Trent’anni di Prevenzione e Protezione dagli Agenti Fisici” che si è tenuto a Modena il 27 maggio 2015. Il Convegno, incentrato come sempre sulla tutela della salute e sicurezza nei luoghi di lavoro, è stato organizzato dalla *Regione Emilia Romagna*, Assessorato alla Sanità, dall’*Azienda Unità Sanitaria Locale di Modena*, Dipartimento di Sanità Pubblica e dall’*INAIL*, Istituto Nazionale Assicurazione contro gli Infortuni sul Lavoro.

L’attenzione ai rischi fisici nei luoghi di lavoro ha a Modena una lunga tradizione. La prima edizione di **dba** è infatti del 1985 e fa anche piacere ricordare che è proprio da questo Convegno che nel 1990 è decollata la rassegna espositiva **Ambiente Lavoro** che anche quest’anno rinnova il sodalizio con **dba**.

Nel percorso iniziato trent’anni fa, dal rischio rumore ci si è successivamente interessati via via alle vibrazioni e poi all’insieme dei rischi fisici, in questo indirizzati tanto dagli interessi degli attori aziendali della prevenzione quanto dall’unitarietà legislativa realizzata da ultimo con il DLgs.81/2008.

Su questa falsariga il Convegno e gli Atti di **dba 2015** sono aperti agli aggiornamenti e approfondimenti di tutti i rischi fisici e si rivolgono principalmente a Responsabili e Addetti dei Servizi di Prevenzione e Protezione aziendali, ai tecnici privati e pubblici d’igiene industriale ed ai medici competenti. L’iniziativa intende promuovere le conoscenze sugli effetti per la salute e sviluppare le esperienze e le criticità operative della valutazione e della misurazione del rischio, ma soprattutto di bonifica, prevenzione e protezione dai diversi agenti di rischio fisici lasciando doverosamente spazio a relazioni su esperienze, approfondimenti e ricerche in tema.

Il Convegno e gli Atti si concludono con una analisi delle implicazioni giuridiche del contesto legislativo attuale.

Gli Atti di **dba 2015** sono disponibili anche in formato elettronico e si avvalgono dei contributi dei principali esperti del settore a livello nazionale. Mi auguro che i materiali presentati possano essere di valido ausilio per gli operatori della tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro.

Ringrazio il Comitato Promotore, il Comitato Scientifico, la Segreteria Scientifica, gli Autori delle relazioni qui raccolte, i partecipanti al Convegno, la Redazione e tutti coloro che hanno contribuito con il loro impegno all’organizzazione della manifestazione.

Il Responsabile Scientifico
Omar Nicolini



Programma

8,30 Apertura delle Iscrizioni

9,00 Apertura del Convegno – Saluti – Avvio dei Lavori

Moderatori: **Davide Ferrari** (Azienda USL di Modena), **Liliana Frusteri** (INAIL),
Luigi Maffei (AIA-Ass. Italiana di Acustica)

Rumore e Vibrazioni

- *Considerazioni sulle criticità riscontrate in vigilanza nelle Valutazioni del rischio e nei comportamenti di prevenzione e protezione aziendali* (**Omar Nicolini**, Azienda USL di Modena)
- *Soluzioni tecniche per la riduzione del rischio rumore* (**Pietro Nataletti**, INAIL Monte Porzio Catone)
- *Vibrazioni impulsive al corpo intero, dati epidemiologici e aggiornamento normativo* (**Massimo Bovenzi**, Università di Trieste)
- *Misure di vibrazioni finalizzate alla riduzione del rischio* (**Alessandro Peretti**, Scuola di Specializzazione in Medicina del Lavoro - Università di Padova)
- *La formazione dei professionisti sull'acustica e le vibrazioni* (**Patrizio Fausti**, Associazione Italiana di Acustica)

Dibattito

Microclima, CEM e ROA

- *Aspetti operativi della misurazione del microclima: dove, quando e quanto monitorare. Interpretazione e valorizzazione dei singoli parametri* (**Alessandro Merlino**, CeSNIR Villasanta).
- *Il microclima dei locali di lavoro ampi a bassa presenza di lavoratori tra risparmio energetico e comfort termico* (**Paolo Lenzuni**, INAIL Firenze)
- *Preparamoci ad effettuare valutazioni corrette dei CEM e a ridurre le relative esposizioni* (**Sara Adda**, ARPA Piemonte)
- *Il rischio fisico da campi elettromagnetici e radiazioni ottiche nelle strutture sanitarie* (**Iole Pinto**, ASL 7 Siena)

Dibattito

13,00-14,00 Sospensione lavori - Pausa pranzo - Buffet

In esposizione:

I Poster di  **A2015**

Pomeriggio

Moderatori: **Pietro Nataletti** (INAIL), **Omar Nicolini** (Azienda USL di Modena),
Alessandro Peretti (Università di Padova)

Esperienze, Approfondimenti e Ricerche

- 14,00** - Locali interrati e seminterrati: definizioni, requisiti aeroilluminanti, autorizzazioni (**Silvia Goldoni**, Azienda USL di Modena)
- Quale strumentazione per la misurazione del rischio da CEM, radiazioni ottiche non coerenti e laser negli ambienti di lavoro (**Francesco Frigerio**, Fondazione Salvatore Maugeri Pavia)
 - Aggiornamenti sul rischio da luce blu (**Bruno Piccoli**, Università Cattolica Roma)
 - Valore della relazione sanitaria anonima e collettiva nel processo di gestione del rischio. Le informazioni relative agli agenti fisici (**Paolo Paraluppi**, ASL di Pavia)

Dibattito

Aspetti giuridici

- Prevenzione e protezione da agenti fisici: compiti, responsabilità, giurisprudenza (**Rolando Dubini**, Avvocato Foro di Milano – Consigliere AIAS)

17,30 *Dibattito / Compilazione questionari ECM*

18,00 *Chiusura lavori*



Trent'anni di Prevenzione e Protezione dagli Agenti Fisici

Modena, 27 maggio 2015

In collaborazione con:



**Coordinamento Tecnico Interregionale
della Prevenzione nei luoghi di Lavoro**



Associazione Italiana di Acustica



Ambiente Lavoro

Indice generale

RUMORE E VIBRAZIONI

Considerazioni sulle criticità riscontrate in vigilanza nelle valutazioni del rischio rumore e nei comportamenti di prevenzione e protezione aziendali

Omar Nicolini pag. 3

Soluzioni tecniche per la riduzione del rischio rumore

Pietro Nataletti, Riccardo Vallergera, Domenico Magnante “ 25

Vibrazioni impulsive al corpo intero, dati epidemiologici e aggiornamento normativo

Massimo Bovenzi “ 37

Misure di vibrazioni finalizzate alla riduzione del rischio

Alessandro Peretti “ 53

La formazione dei professionisti sull'acustica e le vibrazioni

Patrizio Fausti, Luigi Maffei, Marco Carlo Masoero, Nicolò Zuccherini Martello “ 63

MICROCLIMA, CEM E ROA

Aspetti operativi della misurazione del microclima: dove, quando e quanto monitorare. Interpretazione e valorizzazione dei singoli parametri

Gianluca Gambino, Alessandro Merlino, Gabriele Quadrio pag. 71

Il microclima nei locali ampi e con bassa densità di lavoratori, tra risparmio energetico e comfort termico

Daniela Freda, Paolo Lenzuni, Pasquale Capone, Michele del Gaudio “ 91

Lo stress termico dei lavoratori impegnati nelle lavorazioni in serra: studio della variabilità del rischio in funzione delle condizioni di lavoro

Maurizio Diano, Marco Valentini, Ignazio Di Gesu, Pasquale Samele “ 105

Gli alunni misurano la scuola. Condizioni termo-igrometriche e di qualità dell'aria nelle scuole primarie della provincia di Avellino Grazia Memmolo, Carmine Piccolo, Ida Campitelli, Rossella Luciano, Francesca Marotta, Michele del Gaudio	“	117
Microclima in ufficio. Approccio predittivo o adattivo ? Michele del Gaudio, Daniela Freda, Pasquale Capone	“	125
Interventi tecnico funzionali finalizzati alla riqualificazione energetica del Dipartimento provinciale ARPACal di Crotone: valutazioni in tema di miglioramento del comfort termico dei lavoratori Pietro Paolo Capone, Salvatore Ferro, Francesco Italiano	“	133
Microclima in ambiente moderato, 2003–2015: il punto di 12 anni di attività ispettiva. Strumenti, metodologie e criticità legate alla caratterizzazione e valutazione dell'esposizione lavorativa Pierangelo Tura, Marco Fontana	“	143
La strumentazione di misura per le radiazioni non ionizzanti Francesco Frigerio	“	161
Prepariamoci ad effettuare valutazioni corrette dei CEM e a ridurre le relative esposizioni Sara Adda	“	181
Il rischio fisico da campi elettromagnetici e radiazioni ottiche nelle strutture sanitarie Iole Pinto, Andrea Bogi, Francesco Picciolo, Nicola Stacchini	“	193
Valutazione dell'esposizione occupazionale ai campi elettromagnetici in MRI: una procedura per la stima dei parametri definiti dalle linee guida internazionali Stefania Romeo, Anna Sannino, Olga Zeni, Maria Rosaria Scarfi, Rita Massa, Vincenzo Cerciello, Raffaele d'Angelo	“	219
Indicazioni operative per la gestione in sicurezza dei tomografi NMR utilizzati nella ricerca scientifica Massimo Mattozzi, Francesco Campanella	“	229

RADIAZIONI IONIZZANTI

I controlli non distruttivi con l'impiego delle radiazioni ionizzanti. La protezione dei lavoratori e della popolazione Emma Anna Rita Ciconte, Rosario Pirrone, Paola Barbuto, Salvatore Procopio	“	247
--	---	-----

Analisi dei rischi da radiazioni ionizzanti derivanti dalle attività sperimentali con generatore di neutroni del tipo D-T
Nadia Cherubini, Gian Marco Contessa, Alessandro Dodaro, Giada Gandolfo, Luigi Lepore, Giuseppe A. Marzo, Francesco Raona, Sandro Sandri “ 255

Dispositivi di protezione dalle radiazioni x in ambito sanitario: non solo piombo
Domenico Acchiappati, Francesco Campanella, D'Avanzo Maria Antonietta, Moretti Laura “ 263

Stimare il rischio di esposizione dei lavoratori al radon nei luoghi di lavoro alla luce dell'attuale regolamentazione e delle prospettive future
Rosabianca Trevisi, Federica Leonardi “ 269

ESPERIENZE, APPROFONDIMENTI E RICERCHE

Bonifica acustica locale tessitura e controllo attivo del rumore di uno scarico compressore
Piero Calfa, Alessandro Bonaldo “ 279

Studio pilota sulla reale attenuazione delle cuffie di protezione a controllo attivo del rumore
Diego Annesi, Pietro Nataletti, Antonio Moschetto “ 287

Interazione fra rumore, segnali di emergenza ed avvertimento, esiti di una campagna di verifica e controllo
Michele Taddei, Luigi Felisa “ 293

Lo studio delle emissioni otoacustiche come sensibile indicatore di esposizione allo stirene ed al rumore
Renata Sisto, Filippo Sanjust, Luigi Cerini, Giovanna Tranfo, Maria Pia Gatto, Andrea Gordiani, Arturo Moleti “ 309

Interazione sinergica tra rumore e vibrazioni nell'indurre danni all'udito
Enrico Marchetti, Teresa Botti, Filippo Sanjust, Floriana Sacco, Renata Sisto “ 331

FactoryMote: il sistema per il monitoraggio dell'ambiente di lavoro
Alberto Artioli, Alberto Cocheo, Elisa Quattrini “ 347

Tutti insieme appassionatamente: Rumours, Android e la UNI ISO 1999:2015
Stefano Casini “ 357

Esposizione dei lavoratori a vibrazioni dovute all'utilizzo di motoseghe con accumulatore ed elettroseghe Lucia Bertuzzi, Fabio Fabiano, Mauro Giannelli, Enrico Marchi, Riccardo Sabatini	“	369
Riduzione dell'esposizione alle vibrazioni HAV dei motoseghisti del settore forestale di Vicenza: esperienze di addestramento sulla corretta affilatura della catena Miria Righele, Marcello Lovato, Marta Garadozzi, Giancarlo Motterle	“	381
Prime valutazioni delle emissioni di campi elettromagnetici da sistemi antitaccheggio Andrea Bogi, Nicola Stacchini, Iole Pinto, Gianluca Gambino, Gabriele Quadrio, Alessandro Merlino	“	391
Valutazione preliminare dell'esposizione a microonde prodotta da radar marini Marco Valentini, Maurizio Diano, Ignazio Di Gesu, Pasquale Samele	“	403
Aggiornamenti sul rischio da luce blu Bruno Piccoli, Giuseppe Polselli, Ilir Leka	“	415
Locali interrati e seminterrati: definizioni, requisiti aeroilluminanti, autorizzazioni Silvia Goldoni	“	429
Gli apparati di immissione/estrazione dell'aria nei poligoni di tiro a cielo chiuso: valutazioni funzionali ed osservazioni in tema di qualità dell'aria indoor e microclima Pietro Paolo Capone, Emma Ciconte, Renato Giardino, Egidio Villella	“	457
Esposizione ad atmosfere iperbariche: ipotesi di protocollo di ricerca Enrico Marchetti, Agnese Martini, Angelo Tirabasso, Floriana Sacco, Emilia Paba, Antonella Mansi, Giovanna Tranfo, Giuseppe Filomeni, Giuseppina Di Giacomo, Maria Concetta D'Ovidio	“	465
Valore della relazione sanitaria anonima e collettiva nel processo di gestione del rischio. Le informazioni relative agli agenti fisici Paolo Paraluppi	“	477

ASPETTI GIURIDICI

La tutela della salute nella giurisprudenza. Casi esemplari

Rolando Dubini

pag. 483

RIASSUMENDO...

I fattori di rischio fisici nei luoghi di lavoro

***Omar Nicolini, Laura Argenti, Rosaria Falsaperla, Pietro
Nataletti, Alessandro Polichetti, Paolo Zanichelli***

pag. 507

La biblioteca di ***d-A*** & altre Pubblicazioni

pag. 531





Rumore

e

Vibrazioni

In questa Relazione cercherò di portare a sintesi l'esperienza di vigilanza e controllo delle attività di prevenzione attuate dalle aziende evidenziandone le principali criticità con un linguaggio talvolta crudo che, spero, mi perdonerete. Ci conto.

2. DATA CERTA, INCERTEZZA DI MISURA, DPI: I FALSI PROBLEMI DAI TANTI SOTTINTESI

Superato il duro scoglio della taratura (sì, è biennale, e la è diventata da quando è stato abrogato il DLgs.277/91), le questioni che più spesso mi sono state poste dai diversi attori della prevenzione (in particolare da R-SPP e Consulenti, ma non solo) riguardano gli apparentemente insormontabili problemi sottintesi dalla “data certa”, dell'incertezza di misura e della valutazione dei DPI uditivi.

2.1 DATA CERTA

Il tema della data certa è un segnale inequivocabile della prevalenza della forma sulla sostanza in un Paese che non riesce a sganciarsi dalla burocrazia nemmeno a proposito di sicurezza sul lavoro.

Smettiamola di raccontarcela: la data certa, anche se vede la firma del RLS, non significa che l'RLS ne condivida i contenuti, che sia stato consultato “preventivamente e tempestivamente” né che sia stato informato dei risultati della valutazione. L'RLS firma per data certa e basta. Prova ne sia che la data certa si può garantire mediante PEC mentre la consultazione e l'informazione del RLS richiedono quella complicazione straordinaria che consiste nel parlare tra persone diverse (magari ascoltando l'interlocutore) e nel dare il giusto valore a una funzione diversa dalla nostra. Negli accordi tra Associazioni di Categoria e Organizzazioni Sindacali dei Lavoratori si ritrovano modulistiche che puntano a dare evidenza a questa faticosa incombenza, ma tra la modulistica e il fare c'è di mezzo ...

Un'ultima puntualizzazione sulla data certa: la lettura più semplice che vi propongo è “data non falsa”. Il principio stabilito dalla legge è infatti quello di fermare nel tempo e nello spazio un documento per rendere evidente che non si tratti di un artefatto a seguito di una ispezione, di un infortunio o di una malattia professionale. Nell'epoca informatica per redigere, inviare o stampare un (improbabile) DVR ci vogliono pochi danari e poco tempo (vedi Figura 1).

2.1 INCERTEZZA DI MISURA

Come posso fare per esprimere una grandezza che richiede più di una misurazione? Io, consulente, voglio misurare il rumore, ma se seguo le normative (UNI EN ISO 9612:2011 & UNI 9432:2011 ndr) dovrei fare tante misure cosicché non sarei più competitivo. D'altra parte, parte non posso non misurare; qualifica il mio lavoro e poi lo richiede la legge...

Documento Valutazione dei Rischi DVR

ai sensi del D.Lgs 81/08

DA
150,00
EURO

IN OFFERTA

offre alle Aziende la propria consulenza
nella redazione del Documento di Valutazione dei Rischi
(DVR)

**La tua azienda
è in regola con il
Documento di Valutazione
dei Rischi (DVR)?**

Se non l'hai ancora fatto mettiti subito in regola per
non incorrere in sanzioni!

€ 125,00 + iva
DVR con data certa

Mettiti subito in regola!

Richiedilo adesso!

Il tuo Documento di Valutazione dei Rischi a soli 120 Euro

Il tuo DVR in soli due giorni!

Redatto secondo quanto previsto dal D.Lgs 81/08

Richiedilo subito!!!

**a
soli
120 €**
IVA esclusa

Dicono di noi

Figura 1: economici, certi, rapidi. IVA esclusa

Sull'incertezza di misura devo dire che la confusione è ancora veramente grande e anch'io a parlarne continuo a far fatica. Ci riprovo, ma come quasi sempre mi capita, a partire dall'obiettivo finale della valutazione: l'adozione delle misure preventive e protettive adeguate al rischio presente. Per fare questo (quindi per decidere se mettere a disposizione o obbligare all'uso degli ottoprotettori, se effettuare la informazione e la formazione del personale, se far eseguire la sorveglianza sanitaria, se redigere e attuare un piano di bonifica) devo essere certo di non sottostimare il rischio.

Bene: la valutazione dell'incertezza è lo strumento che permette di evitare tale sottostima.

Dal punto di vista tecnico la situazione è chiara: oggi la UNI EN ISO 9612:2011 mette a disposizione uno specifico software per la determinazione dell'incertezza, la UNI 9432:2011 offre una serie di soluzioni per semplificare l'approccio metrologico e la UNI 11326-2:2015 offre la miglior trattazione analitica del tema. Ma qualunque sia la modalità adottata per valutare l'incertezza l'unica ragione per la quale è ragionevole impiegare tempo ed energie in questa procedura è quella di avere una previsione del livello di rischio che consenta le adeguate misure di prevenzione e protezione. In altre parole l'incertezza estesa deve confluire sul L_{EX} e il suo valore va sommato al L_{EX} stesso nel confronto con i valori di riferimento legislativi.

Ce lo ricordano proprio la UNI 9432:2011, la UNI EN ISO 9612:2011 e, più recentemente, la UNI 11326-2:2015.

Per qualunque altro motivo io consulente faccio misure per determinare l'incertezza perdo tempo e faccio inutilmente spendere danari al mio cliente.

Per qualunque motivo io datore di lavoro accetti relazioni che mi propongono misurazioni per la determinazione dell'incertezza non utilizzate come in **Tabella 1**, pago inopinatamente una attività inutile.

Sono situazioni più volte verificate, ma ahimè, questo è il mercato !

Tabella 1: l'incertezza estesa si somma al L_{EX} calcolato, da UNI 9432:2011

$L^*_{EX} = L_{EX} + U(L_{EX})$	
dove:	
$U(L_{EX})$	$= [k \times u(L_{EX})]$ è l'incertezza estesa sul livello di esposizione giornaliera o settimanale;
$u(L_{EX})$	è l'incertezza sul livello di esposizione giornaliera o settimanale;
k	è un fattore numerico che in questo caso vale 1,645.

Occorre anche considerare che in molti casi il DLgs.81/2008, all'art.191, propone una strategia di misurazioni che prescinde dalla valutazione dell'incertezza applicata al L_{EX} .

Certo, si tratta di una modalità valutativa che, se pur cautelativa, appare grossolana. Mi sento dire infatti: *Si, va bene. Ma come farò poi a ricostruire in dettaglio il livello di esposizione nei casi di ipoacusia professionale avendo una generica dichiarazione di "superamento degli 85 dB(A)" ?*

Qui bisogna chiarirci fino in fondo: il DLgs.81/2008 si applica a tutta la popolazione lavorativa italiana, diciamo 17 milioni di occupati, dei quali –ipotizzo– almeno 2-2,5 milioni¹ dovrebbero aver avuto una valutazione del rischio rumore con misurazioni mentre i casi di ipoacusia professionale segnalati all'INAIL sono nell'ordine dei 5.000 casi/anno.

Ha senso effettuare misurazioni tanto approfondite quanto onerose e neppure maggiormente preventive della modalità più semplice per la quasi totalità della popolazione, oppure è più ragionevole effettuare l'analisi più approfondita nei soli casi critici ?

¹ secondo i dati di una procedura da poco avviata e ancora in fase di perfezionamento (ex art.40 e Allegato III-B del DLgs.81/2008), i lavoratori italiani soggetti alla sorveglianza sanitaria per il rischio rumore nel 2013 sarebbero circa 2.050.000.

Nell'epoca della "spending review" la risposta è scontata. Anche perché non si perde nulla: saranno solo le aziende che presentano i casi critici a dovere approfondire, per quei soli casi, la determinazione dei livelli espositivi con la massima accuratezza (secondo le già citate norme tecniche) e riferendosi (in questi casi sì che è tecnicamente corretto) a livelli di esposizione su tempi prolungati, fin anche all'intera vita lavorativa del soggetto.

Il DLgs.81/2008 è legislazione che ha valenza preventiva e non assicurativa.

Le UNI 9612 e 9432 sono norme ottime per le indagini di approfondimento, ma la valutazione del rischio ai fini preventivi è sufficiente che si svolga con metodi molto, ma molto più semplici. Non a caso in tanti altri rischi per la salute nei luoghi di lavoro la misurazione è l'evento di approfondimento, di risoluzione di dubbi e non già la regola.

Auspico che le rigidità da parte di medici competenti, colleghi ASL e anche dell'INAIL che mi vengono riportate siano coerentemente superate.

2.3 DISPOSITIVI DI PROTEZIONE INDIVIDUALE UDITIVI

Nelle relazioni tecniche dei consulenti acustici c'è normalmente un'attenzione ammirevole alla valutazione dei DPI-uditivi.

Attenzione tanto ammirevole quanto però diversificata (direi fin anche creativa nelle metodologie), ripetitiva (che non considera che quegli stessi DPI-u sono già stati valutati per quella ditta e per quei livelli di esposizione), piena di calcoli forvianti (in particolare la ricostruzione dei " L_{EX} a DPI indossati" pericolosamente inutili quando $L_{EX} < 87$ (dBA)), poco concreta (non riferita agli specifici DPI indossati dal lavoratore) e totalizzante (si riesce a pensare solo ai DPI, nient'altro che ai DPI).

Vediamo gli aspetti tecnici.

Definita "efficienza" la capacità potenziale di un DPI-uditivo di proteggere la funzionalità uditiva di un lavoratore ed "efficacia" la reale protezione della funzione uditiva ottenuta dal DPI-uditivo, si rileva che l'art.193, comma 2, definisce i valori obiettivo della valutazione di efficienza dei DPI-uditivi precisando che sono considerati adeguati se, correttamente usati, rispettano le prestazioni richieste dalle normative tecniche.

Dal punto di vista metodologico la UNI-EN 458:2005 e la UNI 9432:2011 mettono a disposizione dei criteri per la valutazione dell'efficienza, mentre ancora nella UNI 9432:2011 appena si accenna alla ben più fondamentale valutazione d'efficacia.

Per il rispetto di queste richieste legislative e normative la mossa giusta è quella di procedere (quando non già disponibile) a una valutazione dell'efficienza come pre-condizione della necessaria (e quasi sempre purtroppo ignorata) valutazione d'efficacia.

Per la valutazione d'efficienza si posso ovviamente seguire tutti i criteri proposti dalla UNI 9432:2011, ma è più che sufficiente verificare che per il/i livelli delle lavorazioni più a rischio (non i L_{EX} !!!), utilizzando il metodo SNR ($L'_{Aeq} = L_{Ceq} - SNR$), non si superino gli 80 dB(A).

Nel caso in cui sia garantita l'efficienza dei DPI-uditivi, i valori limite di esposizione sono sempre rispettati².

Se $L_{Ceq} - SNR > 80$ dB(A) i DPI-u non sono adeguati (sono inefficienti) e vanno sostituiti con altri più performanti.

Suggerirei infine di tener conto della iperprotezione ($L'_{Aeq} < 65$ dB(A)) solo su specifica segnalazione del lavoratore (ma però vogliono sentirsi...) o quando si manifestano difficoltà a indossarli (l'eccessivo isolamento dall'ambiente acustico circostante induce i lavoratori al rifiuto all'utilizzo).

Per la valutazione d'efficacia (è questo che chiede la legge, l'efficienza è una pre-condizione!) occorre invece verificare:

- che non si siano determinati peggioramenti nella funzionalità uditiva dei lavoratori utilizzando la relazione sanitaria anonima e collettiva redatta dal medico competente. Qualora emergessero peggioramenti uditivi apprezzabili occorrerà verificarne il nesso con le condizioni espositive affrontando il problema con il medico competente stesso;
- che sia effettivamente presente un sistema di sorveglianza sui DPI-u con una attenzione aziendale che garantisca quanto meno che il personale li indossi correttamente, ne faccia un uso regolare nelle situazioni di rischio, ne abbia corretta custodia e manutenzione. Fondamentale su questi aspetti il ruolo della formazione.

Poiché i DPI-u devono essere messi a disposizione al superamento dei valori inferiori di azione (VIA: 80 dB(A) per $L_{EX,8h}$ e/o 135 dB(C) per $L_{picco,C}$), la valutazione di efficacia (che comprende quella di efficienza) deve essere condotta al superamento di tali valori.

Detto tutto questo sappiate che:

- il metodo SNR basta e avanza. In presenza di metodi che magicamente trasformano i dB(C) in dB(A) e viceversa, che partono da valori di attenuazioni forniti dai produttori in situazioni non proprio reali, che stimano una efficienza di tipo statistico e che danno luogo a differenze anche di una decina di dB tra un metodo di valutazione e l'altro, credere di fare valutazioni precise (e addirittura di prevedere il livello di pressione sonora al timpano) è pura follia...
- non è il caso di disperarsi se i vostri DPI-u non hanno un fattore β ; questo fattore la cui applicazione è facoltativa, è stato arbitrariamente introdotto da normative americane che sono diverse dalle nostre e il suo uso risulta normalmente fuorviante perché punta a stimare matematicamente l'effetto anche di violazioni legislative (mancata o carente formazione) che vanno superate e non stimate. Se proprio non riuscite a farne a meno sappiate che entra nel calcolo dell'efficienza e non per capire se il DPI-u è efficace.

Ma soprattutto ricordate che se i DPI sono indossati correttamente e al momento giusto vanno praticamente sempre bene³ e ottengono l'effetto desiderato di impedire l'insorgenza delle ipoacusie professionali. Peccato che non rispettino il principio

² Nella mia personale casistica non ho mai trovato una condizione per la quale un DPI-u presente sul mercato non fosse in grado di far rispettare un livello "attenuato" superiore agli 87 dB(A) ($L'_{Aeq} > 87$) tale che, protratto per il turno lavorativo, si corresse il rischio del superamento dei valori limite rms.

Dirò di più, non mi è mai capitato che fosse impossibile garantire l'efficienza dei DPI-u ($L'_{Aeq} < 80$) !

³ cioè risultano sostanzialmente sempre adeguati; per far sì che non lo siano occorre impegnarsi !

della priorità delle misure di prevenzione collettiva sulle misure di protezione individuale !

Quindi, riassumendo:

- Le misure di prevenzione collettiva (tecniche e organizzative), obbligatorie al superamento dei VSA (85/137), sono da adottarsi prima dei DPI-u;
- La valutazione dell'efficienza è solo pre-condizione della valutazione d'efficacia;
- La valutazione dell'efficienza si effettua sui livelli equivalenti delle attività (es: sul L_{Aeq}) e non sui L_{EX} ;
- Il fattore β , se usato (è facoltativo), fa parte della valutazione dell'efficienza;
- La valutazione dell'efficienza si conclude con: il DPI-u in dotazione "va bene" oppure "è da cambiare" e non con un inutile L_{EX} '. Questo calcolo per la verifica del rispetto dei VLE ha senso⁴ solo quando il L_{EX} è > 87 e non si fosse riusciti a trovare un DPI-u efficiente⁵;
- La valutazione dell'efficacia si completa in rapporto col medico competente nonché verificando l'effettivo utilizzo dei DPI-u e la loro corretta gestione;
- Una valutazione negativa dell'efficacia dei DPI-u (nuovi peggioramenti uditivi, DPI non indossati...) comporta l'esigenza di ricontrollare la valutazione del rumore perfezionando in particolare le misure di prevenzione e protezione le quali, così come sono, stanno fallendo.

3. COSA C'È CHE NON VA

Fino ad ora abbiamo scherzato.

A mio avviso i problemi veri vengono qui e, salvo le dovute (ma rare) eccezioni, si chiamano:

- interesse delle aziende a considerare il rumore come un rischio da controllare solo con i DPI uditivi e la sorveglianza sanitaria;
- subordinazione dei consulenti alle suddette esigenze aziendali, soprattutto perché questi risultano privi nel concreto di responsabilità (penale e/o amministrativa);
- minimo interesse dei fabbricanti a produrre macchine meno rumorose e con dati attendibili di emissione acustica per assenza/carenza di richieste di mercato;
- assenza di attenzione dei lavoratori schiacciati dal problema di conservare il posto di lavoro unita alla debolezza del ruolo degli RLS;
- incapacità degli Organi di vigilanza a contrastare efficacemente questa situazione soprattutto per le diverse scelte di priorità compiute (anche condivisibili, ma ...).

Non mi va però di fare discorsi generici, che per altro potrebbero tranquillamente estendersi a quasi tutti i rischi per la salute sui luoghi di lavoro.

⁴ veramente ha poco senso anche qui. Come detto, nella mia esperienza il L_{EX} che tiene conto dell'effetto dei DPI-u risulta superiore ai Valori Limite solo quando ... i DPI non si indossano o non si possono indossare. Ma anche qui una sorpresa: se i DPI-u non si possono indossare come mai non risulta in Italia alcuna richiesta di deroga ex art.197 ?

⁵ a quel punto suggerisco all'azienda di cercare un rivenditore di otoproettori e non fermarsi alla prima ferramenta...

Esaminiamo nel concreto queste criticità in riferimento alle azioni di prevenzione e protezione dal rischio rumore previste dalla legislazione.

E ovviamente ci incentriamo sulla Valutazione del Rischio proponendovi a seguito alcune considerazioni sul tema non perfettamente consolidate dai più e sulle quali, lo prometto, accetterò anche critiche pesanti.

Il contesto cui farò riferimento è quello che più normalmente ho incontrato nelle aziende:

- la Valutazione del Rumore (VdR) viene affidata dal datore di lavoro a un consulente il quale, al termine del suo lavoro consegna una relazione tecnica che viene messa in allegato al Documento di Valutazione del Rischio (DVR);
- negli appalti si redige il DUVRI e nei cantieri il CSP elabora il PSC che viene confrontato con i POS delle imprese vincitrici dal CSE⁶.

Esamineremo però anche la VdR nei nuovi posti di lavoro, quel che ci offrono i fabbricanti, il possibile ruolo delle banche dati, il PARE.

3.1 PERSONALE QUALIFICATO

Prima riflessione: la VdR è un atto indelegabile del datore di lavoro, per cui "l'affidamento" può riguardare aspetti tecnici, metrologici, la definizione di proposte, ma non la VdR vera e propria che deve essere condotta (e conclusa) dal datore di lavoro anche se, normalmente, proprio sulla base delle risultanze/delle proposte del consulente.

Ed è il datore di lavoro la persona qualificata che, mediante la valutazione del rischio, decide che cosa effettivamente farà o non farà.

Sarebbe il caso di smetterla (è una riflessione per me e per i miei colleghi delle ASL) di far finta che una relazione tecnica firmata dal solo consulente sia una VdR del datore di lavoro, così come di pensare che è il consulente la "persona qualificata". Il consulente, quando va bene, conosce la legislazione e le normative, le applica, sa usare il fonometro, sa fare proposte per la riduzione del rischio⁷, sa ricordare gli obblighi legislativi, ma se ne lava le mani dei tempi di esposizione e di quello che farà o non farà l'azienda per ridurre il rischio. Né gli si può imputare alcunché se un datore di lavoro decide, magari anche contro le indicazioni del consulente stesso, di non fare nulla o non tutto quello che si può fare per controllare il rischio. Il consulente nel DLgs.81/2008 non esiste e l'unico modo per chiamarlo in causa è, attraverso il codice penale, quando si è determinato un danno sempreché le sue indicazioni abbiano indirizzato il titolare di posizioni di garanzia (normalmente: il datore di lavoro) a decisioni errate (ad esempio sottostimando il livello di esposizione).

Un datore di lavoro che non acquisisce i risultati delle misurazioni del rumore (è questo quel che fa il consulente: misura il rumore e ci fa su dei calcoli e delle proposte) per trasformarli in azioni di prevenzione è un datore di lavoro che non ha effettuato la valutazione del rumore.

⁶ Per non morire di sigle: DUVRI=Documento Unico di Valutazione dei Rischi Interferenti; PSC=Piano di Sicurezza e Coordinamento; POS=Piano Operativo di Sicurezza; CSP=Coordinatore alla Sicurezza in fase di Progettazione; CSE=Coordinatore alla Sicurezza in fase di Esecuzione

⁷ caso davvero raro

3.2 RELAZIONE TECNICA E DVR: CHI FA COSA

Seconda riflessione: la valutazione del rischio non è un processo fine a se stesso, ma serve per capire se ho un rischio rumore, quanto è grave, dove si origina/manifesta, cosa posso fare per eliminarlo o ridurlo al minimo e per proteggere la salute dei miei lavoratori.

Per fare questo ho bisogno di censire le attrezzature e le lavorazioni rumorose e, disponendo di planimetrie con layout, di effettuare misurazioni sulle macchine e sugli ambienti⁸ per capire se e come è possibile ridurre il rischio⁹ e adottare ottoprotettori adeguati, di effettuare le misurazioni nelle situazioni operative che concorrono alle condizioni di rischio che devo descrivere¹⁰ preoccupandomi poi di integrarle con i tempi di esposizione che la legge mi richiede¹¹, di verificare se esistono aree da segnalare come pericolose (vedi Figura 2).



Figura 2: il misconosciuto

In generale, gli obiettivi della VdR quando c'è un apprezzabile rischio rumore sono quindi:

- definire le misure tecniche e organizzative che saranno adottate;
- individuare le aree e le macchine a forte rischio;
- indicare se i DPI-uditivi sono efficaci oppure le caratteristiche di quelli idonei;
- indicare i L_{EX} e $L_{picco,C}$ e i fattori accentuanti il rischio degli esposti.

Quando l'azienda si avvale di un consulente capace, questo effettuerà la sua indagine seguendo tutte le corrette procedure del caso e la formalizzerà con una relazione tecnica che, in conclusione, metterà in condizione il datore di lavoro di prendere le decisioni più efficaci (massimo risultato/minimo costo) tenendo conto dell'obbligo al rispetto della legge.

Tutto quello che il consulente non avrà voluto o saputo fornire ricadrà nella responsabilità del datore di lavoro che o è in grado di integrare il compito del

⁸ ad esempio i T_{60} o DL_2 ; a volte il potere fonoisolante e altri parametri di acustica in edilizia, non rilievi "a centro ambiente" che non hanno valore progettuale e, quasi sempre, neppure ai fini espositivi

⁹ per cortesia smettiamola di riscrivere il contenuto dell'art.192, comma 1. Serve sapere cosa si potrebbe davvero fare in quell'azienda. Se non siete capaci, lasciate perdere

¹⁰ ...e non quelle che casualmente trovo il giorno in cui vado a fare le misurazioni

¹¹ situazioni ricorrenti a massimo rischio, che tengano conto anche del lavoro straordinario

consulente (magari mediante il proprio RSPP) o si troverà in una condizione di inottemperanza alla legislazione (carente valutazione dei rischi).

Più semplice, ovviamente, il compito se il rischio rumore è modesto (non supera i VIA) o addirittura se il rischio è “giustificabile”.

La “giustificazione” del datore di lavoro secondo cui la natura e l'entità dei rischi non rendono necessaria una valutazione dei rischi più dettagliata è la modalità prevista dalla legislazione sugli agenti fisici per interrompere rapidamente il processo valutativo in caso di assenza di rischio o di sua palese trascurabilità. Si tratta quindi di un comportamento applicabile a tutte e sole quelle situazioni poste ampiamente al di sotto dei valori di riferimento che comportano specifiche azioni preventive (significativamente inferiori ai valori inferiori di azione), in quanto per condizioni di rischio più consistenti occorre comunque definire i livelli di rischio al fine di decidere se nel contesto analizzato debbano essere adottate particolari, pur minime, misure di prevenzione e protezione.

In questo caso (al di sotto dei valori inferiori di azione) la relazione del consulente dovrebbe articolarsi comunque in:

- Premessa (ditta, date, tecnico incaricato, strumentazione ...)
- Layout (piantina e nomenclatura: produzione, macchine, esposti ...)
- Valutazione della presenza delle condizioni di rischio indicate all'art.190, comma 1 (rumori impulsivi, ototossici, vibrazioni, ...)
- Motivazioni che escludono il superamento dei valori di azione inferiori nella giornata/settimana/settimana ricorrente a massimo rischio (es.: dati di letteratura o misurazioni estemporanee).
- Conclusioni con eventuali indicazioni specifiche per la riduzione del rischio.

3.3 DUVRI, PSC E POS

Constatazione e terza riflessione: nella legislazione attuale la VdR del rumore (come di quasi tutti i rischi) avviene in 3 contesti diversi: nell'ambito aziendale redigendo poi il DVR (caso di cui abbiamo sinora parlato), ma anche nell'ambito dei contratti d'appalto o d'opera con il DUVRI e nell'ambito del cantiere con la coppia di documenti PSC e POS¹².

Come noto, il DUVRI si applica (sostanzialmente) in tutti i casi di affidamento da parte di un datore di lavoro di lavori ad impresa appaltatrice o a lavoratori autonomi all'interno della propria azienda o nell'ambito dell'intero ciclo produttivo dell'azienda medesima.

In riferimento ai rischi da rumore, il datore di lavoro committente nel redigere il DUVRI di cui all'art.26, comma 3, del DLgs.81/08, è chiamato a tenerne conto individuando le misure di prevenzione e protezione da adottarsi per ridurre al minimo i rischi derivanti dalle possibili interferenze (coordinamento delle diverse attività, limitazione della durata delle esposizioni, impiego DPI, etc...) e ciò può essere concretizzato ad esempio indicando i luoghi di lavoro dove i lavoratori potrebbero essere esposti a rumori che superano i livelli inferiori di azione e

¹² l'affermazione contenuta in questo periodo è una semplificazione, la prevenzione dei rischi si deve fare anche quando non ci sono PSC e POS o DUVRI, ma questa è la ricorrenza normale.

precisando le misure di prevenzione e protezione da adottarsi (momenti nei quali si verificano le interferenze, esigenze di impiego dei DPI-uditivi, di formazione e informazione, di controllo sanitario ...).

Stesso discorso nel caso dei cantieri temporanei o mobili dove il DUVRI è scisso in due momenti, il PSC da redigere a carico del Committente prima della gara d'appalto e il POS a carico della ditta in appalto da comunicare al Coordinatore per l'esecuzione prima di entrare in cantiere.

Ma quanti sono i DUVRI e l'insieme di PSC e POS che propongono misure concrete per ridurre i rischi da rumore (e in particolare quelli da interferenze) senza riferirsi unicamente ai DPI-u?

Nella mia esperienza l'esito della risposta è desolante.

Ci si potrebbe chiedere se vale la pena imporre in maniera generalizzata un disposto (nei cantieri: nomina di CSP e CSE redazione del PSC & POS; negli altri appalti: DUVRI) che non concretizza nulla o quasi. I riscontri positivi su altri versanti (altri rischi) orientano di nuovo pensare che il problema, per il rumore, sia riconducibile tanto al disinteresse all'adozione di misure di carattere collettivo quanto all'assenza/carenza di controlli delle ASL. In fondo, la riduzione del numero di infortuni mortali in edilizia pare proprio andare in questo senso.

3.4 LA VdR NEI NUOVI POSTI DI LAVORO

DLgs.81/2008; art.28, comma 3-bis: In caso di costituzione di nuova impresa, il datore di lavoro è tenuto a effettuare immediatamente la valutazione dei rischi ...

Si potrebbe dire: Ma come si può valutare il rischio se ancora le macchine, il ciclo produttivo, non sono in funzione ? Cosa misuro ? Dovrò aspettare che la produzione sia a regime per misurare e poi decidere cosa fare...

La diagnosi per questo presunto individuo potremmo condividerla in "misuratore ansioso, affetto da carenza legislativa estesa".

Certo, su questo punto c'è da convenire che il testo legislativo non brilla per chiarezza (c'è riuscito solo per gli agenti chimici), ma il principio è che si deve partire a lavorare già con una azienda sicura per cui la valutazione l'ho già fatta prima di iniziare la produzione.

Esaminando il DLgs.81/2008 nel suo complesso e pensando a una realtà produttiva rumorosa, ci si immagina questa sequenza di situazioni in capo al datore di lavoro:

- 1) quando avvio l'attività produttiva faccio tutto il possibile per (far) progettare un luogo di lavoro che applichi i principi della riduzione del rischio e per acquistare attrezzature che emettano il minimo possibile di rumore e realizzi le insonorizzazioni che servono per ridurre il rumore dei processi produttivi ancor prima di iniziare la produzione;
- 2) all'avvio della produzione adotterò quella serie di precauzioni di minima che mi suggerisce l'esperienza e consentono comunque di tenere il rischio sotto controllo (DPI, formazione/informazione);
- 3) poco dopo che la produzione è a regime la prima volta, e periodicamente poi, verificherò i livelli di rumore presenti in azienda e, se peggioreranno, interverrò per ridurli. Sui livelli di rischio che non riesco a ridurre con misure tecniche od

organizzative perfezionerò o integrerò le azioni di tutela del personale (DPI, formazione/informazione, sorveglianza sanitaria).

Quello che per non tutti è chiaro è che valutare non è necessariamente (o non è solo) misurare dei livelli di esposizione a rumore e calcolare dei L_{EX} .

La fase 1), che è la fase più virtuosa dell'applicazione della legge finalizzata a prevenire i rischi alla radice, è valutazione che (udite, udite!) non si avvale di misurazioni. O meglio, non si avvale delle misurazioni che definiscono i valori di esposizione, ma potrebbe utilmente ricorrere a misurazioni delle emissioni acustiche (L_W , ma anche L_P) e di parametri acustici edilizi per poi manipolare questi dati (nei casi più semplici con formule, ma anche ricorrendo a modellistiche), per avere previsioni di livelli di rischio da correggere o meno con le possibili bonifiche acustiche.

Queste valutazioni preliminari si fanno per le strade, per le ferrovie, anche per la previsione del disturbo acustico di aziende. Bene, a mio avviso quando si insedia o si ristruttura una azienda con ciclo produttivo notoriamente rumoroso (da Letteratura, dai dati della sede o della sistemazione precedente) ed essa non ricorre a queste previsioni e soluzioni, si merita pienamente l'attenzione degli Organi di Vigilanza.

3.5 I FABBRICANTI

Mi aggancio al tema dei nuovi insediamenti produttivi e delle ristrutturazioni per analizzare i compiti dei fabbricanti e quel che fanno davvero.

Sempre salvo le gradite, ma troppo rare, eccezioni.

Come noto, ai sensi del DLgs.17/2010 (recepimento della direttiva macchine), i fabbricanti di macchine sono tenuti a:

- adottare tutte le misure per ridurre la generazione di rumore alla fonte;
- informare gli acquirenti dei livelli di emissione sonora della macchina secondo questa scaletta¹³:
 - se la macchina presenta valori di pressione sonora in posizione operatore fino a 70 dB(A), si può semplicemente dichiarare il mancato superamento di quel valore;
 - se la macchina presenta valori superiori a 70 ma inferiori a 80 dB(A), si deve indicare esattamente il livello di pressione sonora in posizione operatore;
 - se la macchina presenta valori superiori a 80 dB(A), si deve indicare oltre al livello di pressione sonora in posizione operatore anche il livello di potenza acustica;
 - se la macchina presenta livelli di picco superiori a 130 dB(C), lo si deve indicare.

E' poi utile ricordare che la legislazione per la tutela della salute e sicurezza sui luoghi di lavoro ha voluto privare gli organi di vigilanza (le ASL) del dovere/potere di controllare il rispetto di questi precetti¹⁴, riservando loro solo il compito di

¹³ il DLgs.17/2010 presenta anche altri casi (es.: le macchine di grandi dimensioni), ma qui ci soffermiamo su quelli più ricorrenti

¹⁴ quando riscontrano presunte violazioni degli obblighi del fabbricante le ASL devono segnalare il fatto al MISE, al Min.Lavoro e alla loro Regione dando avvio a una procedura che quando va bene si conclude nell'arco di 2-3 anni

vigilare sull'obbligo dell'acquirente di scegliere macchine che espongano al minor livello di rischio possibile.

Quello che mi preme sottolineare relativamente a questo argomento è che la legislazione fa acqua da tutte le parti per una vasta serie di motivi che si sostanzia però nel fatto che gli obblighi dei fabbricanti sul rumore sono generalmente disattesi o aggirati e il sistema di vigilanza non è in grado di contrastarlo.

Evidenzio questi tre aspetti:

- lo scarso impegno dei fabbricanti nella ricerca e nell'inserimento sulla macchina di soluzioni per la riduzione del rischio rumore che a volte vengono (inopinatamente) vendute come optional, ma anche come tali viste dall'acquirente;
- i fabbricanti più attenti ai loro interessi fanno emanare norme di certificazione acustica "a vuoto"¹⁵ che rendono inutili le informazioni fornite agli acquirenti¹⁶;
- i fabbricanti sono posti davanti a un obbligo informativo di valenza generale (relativo a tutte le macchine), ma l'utilizzo concreto¹⁷ di tali dati, e in particolare dei livelli di potenza acustica, è irrilevante.

E dire che, probabilmente, sarebbe bastato mantenere in vita l'art.46 del DLgs.277/91 (vedi Figura 3) o anche affermare gli stessi obblighi previsti per le Schede di Sicurezza a carico dei produttori di sostanze pericolose (fornirle) e degli acquirenti (richiederle), obblighi entrambi soggetti alla vigilanza diretta delle ASL.

3.6 LE BANCHE DATI

Per quanto concerne l'esposizione professionale alle vibrazioni meccaniche, già da una decina d'anni (con l'approvazione del DLgs.187/2005, ora assorbito nel DLgs.81/2008) è stato consentito ai datori di lavoro di effettuare la valutazione del rischio¹⁸ sulla base di banche dati qualificate, messe a disposizione dall'ISPESL (ora INAIL) o delle Regioni.

2) I nuovi utensili, macchine e apparecchiature destinati ad essere utilizzati durante il lavoro che possono provocare ad un lavoratore che li utilizzi in modo appropriato e continuativa un'esposizione quotidiana personale al rumore pari o superiore ad 85 dB(A) sono corredati da un'adeguata informazione relativa al rumore prodotto nelle normali condizioni di utilizzazione ed ai rischi che questa comporta.

3) Il datore di lavoro privilegia, all'atto dell'acquisto di nuovi utensili, macchine, apparecchiature, quelli che producono, nelle normali condizioni di funzionamento, il più basso livello di rumore.

Figura 3: passaggio rimpianto del DLgs.277/91 (art.46, commi 2 e 3)

¹⁵ situazione che il DLgs.17/2010 consente se esistono norme armonizzate di tipo C; ma chi "armonizza" sa di avallare il fallimento dello scopo della legge ?

¹⁶ nella mia ultima esperienza a fronte di un valore dichiarato di 67 dB(A) ho misurato livelli dell'ordine di 92-93 dB(A) !

¹⁷ le aziende non li richiedono e/o non li valutano, i consulenti non li utilizzano, anche perché frequentemente non li sanno utilizzare

¹⁸ sarebbe più corretto dire: "per la determinazione dei livelli di esposizione" o anche "per la determinazione dei livelli di esposizione ai fini della valutazione del rischio"

E' stata così realizzata una banca dati, che ad oggi contiene informazioni sui livelli di vibrazioni relativi a circa 1450 utensili e 1050 mezzi, consultabile sul sito della Regione Toscana-ASL di Siena all'indirizzo: www.portaleagentifisici.it.

Questa banca dati ha di fatto costituito una formidabile palestra per sperimentare pregi e difetti di tale modello di sostegno al processo di valutazione del rischio.

L'utilizzo di banche dati per la determinazione dei livelli di esposizione ai fini della valutazione dei rischi è materia molto delicata per le evidenti implicazioni di carattere legale, metrologico e statistico. Infatti, le banche dati riportano i valori rilevati su macchine, attrezzature o apparecchiature di determinato tipo, marca e modello poste in determinate condizioni di lavoro ovvero rilevate su mansioni esercitate in uno specifico contesto.

Si pone quindi il problema se e quanto, anche sul rumore, i valori delle banche dati possano essere rappresentativi delle condizioni che si intendono descrivere tenuto conto delle molteplici variabili in gioco.

Da un punto di vista rigorosamente scientifico molte sono le contestazioni che si possono avanzare. Prendendo ad esempio il rumore si può osservare che esso non dipende solo dal tipo di macchina (ossia se essa è una pala meccanica, una smerigliatrice angolare, ecc.) e dalla marca e dal modello (es: potenza del motore, massa, dimensioni, componenti, criteri progettuali, ecc.), ma dipendono anche da altri parametri la cui influenza è in genere sovrastante, quali presenza o meno di dispositivi insonorizzanti (es.: cabine o schermature sulla macchine o le sue parti più rumorose, silenziatori sugli sfiati di ac, ...), le condizioni e le modalità di impiego (all'aperto/al chiuso, in ambienti riverberanti o meno, vicina o meno ad altre sorgenti rumorose, ritmo di lavoro, ...). E ci sarebbe molto altro ancora da analizzare.

Non v'è dubbio che la rappresentatività del dato con questo livello di dettaglio è impossibile.

Si può però provare a riflettere se effettivamente la determinazione del livello di esposizione ai fini della valutazione del rischio debba essere così dettagliata. Si può cioè chiedersi se una perfetta descrizione delle pressoché infinite modalità di esposizione di ogni singolo lavoratore nell'arco di tempo per il quale è normalmente valida una VdR (4 anni) siano effettivamente necessarie per stabilire ciò che la legge fa discendere dai livelli di esposizione (disponibilità/obbligo all'uso dei DPI, esigenza e frequenza della sorveglianza sanitaria, necessità della informazione e formazione sui rischi). E per stabilire se fornire o meno i DPI, se fare il controllo sanitario e l'informazione/formazione dei lavoratori anche la legislazione sul rischio rumore orienta a riferirsi della situazione ricorrente a massimo rischio, con un approccio certamente non pienamente rappresentativo dal punto di vista scientifico, ma invece, pragmaticamente preventivo.

In sostanza si tratta di recuperare il senso effettivo della valutazione del rischio così come chi si occupa di igiene del lavoro dovrebbe perseguire: non una indagine con misurazioni solamente fini alla determinazione dei L_{EX} , ma approfondimenti principalmente laddove questi servono per sostenere corrette ricadute preventive.

Poi ci saranno anche situazioni nelle quali è dovuto l'approccio tecnico-scientifico accurato nella determinazione dei L_{EX} (come le indagini di malattia professionale o le indagini nelle quali si va a stabilire una responsabilità penale) e altre nelle quali le misurazioni servono per capire/stabilire gli interventi insonorizzanti da attuare.

Occorre però convenire che il sistema Italia paga oggi cifre elevate per indagini che producono poca o nulla ricaduta preventiva e che potrebbe risparmiarsele.

Relativamente al rischio rumore (e in generale per tutti gli agenti fisici), le banche dati basati su valori di livello di rischio (emissione da attrezzature di lavoro fornite dai produttori o valori di esposizione misurati sul campo) da trasformare in livelli di esposizione basandosi sui tempi di esposizione propri di ciascun lavoratore in ciascuna azienda integrate in una procedura guidata di correzione dei valori a seconda delle condizioni d'impiego¹⁹ mi paiono essere la soluzione che meglio compenetra l'esigenza di semplificare la fase della determinazione del L_{EX} con quello di fornire una elevata tutela della salute dei lavoratori.

Partendo dagli obiettivi che la legge assegna alla definizione dei livelli di esposizione dei lavoratori si può considerare il ricorso alle informazioni contenute nelle banche dati come una opportunità che i datori di lavoro avranno²⁰ per risolvere rapidamente quali misure di tutela assegnare ai lavoratori esposti, sempre che questo avvenga con il dovuto margine di sicurezza. Se questo avverrà, le misurazioni manterranno comunque lo scopo più nobile di risolvere le situazioni espositive border-line e per stabilire le corrette modalità di prevenzione e protezione dal rischio. Viceversa rimarrà comunque diritto del datore di lavoro ed anche dell'organo di vigilanza di avvalersi pienamente delle misurazioni essendo queste la modalità più precisa per descrivere la situazione espositiva.

Un'ultima puntualizzazione; non si capisce perché l'utilizzo di banche dati dovrebbe essere riservato solo a particolari settori (edilizia e agricoltura) che sono tra i più problematici dal punto di vista metrologico, quando il loro impiego nella generalità dei casi risulterebbe più affidabile.

3.7 IL PARE

PARE o non PARE ?

Il DLgs.81/2008 ha stabilito l'obbligo delle aziende a formalizzare il piano degli interventi tecnici e organizzativi al superamento dei valori superiori di azione.

Si tratta (forse²¹) di un passaggio rafforzativo dell'obbligo primario al controllo del rischio mediante misure tecniche e organizzative di tipo collettivo volto a superare una generale disattenzione degli attori aziendali della sicurezza e dei controlli degli organi di vigilanza.

Il programma delle misure tecniche ed organizzative ex art.192, comma 2, deve quindi essere presente nel documento di valutazione di tutte le aziende che hanno esposti al di sopra dei valori superiori di azione (85 dB(A) di L_{EX} o 137 dB(C) di $L_{pico,C}$) e sia le *Indicazioni operative* del Coordinamento delle Regioni che la norma UNI 11347:2015 (che definisce un modello dei programmi aziendali di riduzione dell'esposizione a rumore, sintetizzato nell'acronimo "PARE") si sono prodigate per fornire indicazioni su percorsi e contenuti.

¹⁹ vedi proposta all'indirizzo: www.portaleagentifisici.it/fo_rumore_calcolo_esposizione.php?lg=IT

²⁰ per il rumore oggi questa opportunità non è consentita dalla legge

²¹ il DLgs.277/91 e prima ancora il DPR 303/56 richiedevano l'adozione delle misure (concretamente attuabili) di riduzione del rischio indipendentemente dai livelli di rumore presenti in azienda

Riguardo alle misure tecniche e organizzative adottabili si segnala poi che suggerimenti concreti possono essere tratti anche dal “Manuale operativo per la riduzione del rumore negli ambienti di lavoro” approvato dalla Commissione Consultiva ex art.6, DLgs.81/2008, in data 30/11/2012²².

Insomma: suggerimenti, indicazioni e aiuti ci sono. Quello che troppo di frequente manca è proprio il PARE...

E dire che tutte queste attività sono state messe in campo per porre freno al malcostume, invece ancora troppo diffuso, di proporre generiche affermazioni d'intenti, spesso neppure accompagnate da date, dietro le quali si trincerano aziende disattente, sostenute da compiacenti (non di rado anche incapaci) consulenti, per non dare effettiva concretizzazione alla parte essenziale della valutazione, vale a dire il superamento dei problemi evidenziati.

Per mia esperienza situazioni di questo tipo si manifestano quando i principi legislativi non sono presidiati. Ciò a dire che se non è diffusa l'abitudine di richiedere l'ottemperanza ad un certo precetto legislativo se ne perde l'applicazione. Qui mi rivolgo soprattutto al mondo delle ASL.

Se ci fosse un punto, un solo punto, da salvare nel campo della prevenzione dei rischi da rumore è che chi ha molto rumore deve darsi da fare per ridurlo.

Il passo successivo è solo dire che non ce ne importa nulla ... naturalmente perché abbiamo altre priorità.

E però attenzione, perché il problema sta già riguardando il controllo (quello concreto, non documentale o di ricerca) anche di tutti gli altri rischi per la salute sui luoghi di lavoro !

4 - UN PERSONALISSIMO QUADRO DI SINTESI

Stavo dimenticandomene; avevo promesso di portare a sintesi la mia esperienza di vigilanza e controllo delle attività di prevenzione attuate dalle aziende evidenziandovi le principali criticità sulla valutazione dei rischi e sulle azioni a questa conseguenti. In questo capitolo elencherò tali criticità cercando di fornirvele in un grossolano ordine di gravità, secondo il mio personalissimo giudizio.

Per questa volta: spiegazioni ridotte all'osso.

Eccovi le più gravi:

- Valutazioni del Rischio (nei DVR, PSC, POS e DUVRI) assenti, anche in evidenti situazioni di rumore elevato;
- Valutazioni incomplete, in particolare per l'assenza del PARE (per la confusione, spesso voluta, che si fa tra “valutazione dei rischi” e “determinazione dei livelli di esposizione”). Non è un PARE il riscrivere l'art.192, comma 1 del DLgs.81/2008;

²² il testo è disponibile all'indirizzo:

- Mancata collaborazione alla Valutazione del rumore da parte del medico competente e disattenzione alla correlazione tra dati sanitari (es.: peggioramenti uditivi) e aspetti tecnici di prevenzione (sottostima dei L_{EX} , carenti azioni di controllo del rischio);
- Mancato coinvolgimento di RLS e lavoratori alla VdR indotto tanto dalla sottovalutazione dei loro ruoli quanto dalla sottovalutazione delle conoscenze e dei suggerimenti che potrebbero arrivare per una VdR più veritiera e completa;
- Incompetente (stupida) indicazione che le azioni di prevenzione e protezione si assumono sui L_{EX} che tengono conto dell'effetto dei DPI-uditivi;
- Mancata appropriazione dei risultati della Valutazione del Rischio rumore da parte aziendale (Datore di Lavoro o chi, in concreto, è chiamato a intervenire).

E queste sono le altre che più ricordo come troppo frequentemente presenti:

- Relazioni tecniche carenti o artefatte per:
 - sottostima (a volte “guidata”) dei tempi di esposizione (T_e) delle fasi più rumorose²³ che inducono minori azioni di prevenzione e protezione che l'azienda dovrebbe attuare. Sono mitici i $L_{EX} = 84,9 \text{ dB(A)}$!
 - carente considerazione del ciclo produttivo da parte del consulente (raramente si progetta l'intervento definendo le condizioni da misurare, mentre più spesso le misurazioni avvengono sulle condizioni produttive presenti all'atto del sopralluogo);
 - tipologia di strumentazione inadeguata (pochissimi consulenti utilizzano fonometri portatili o dosimetri, anche quando la mobilità del lavoratore esposto ne imporrebbe l'utilizzo);
 - assente o generica descrizione delle condizioni di lavoro misurate e della indicazione della posizione del punto di misura;
 - determinazione dei L_{EX} in riferimento a tempi non congrui (superiori alla settimana) che induce sottostima nelle azioni di prevenzione e protezione che l'azienda dovrebbe attuare;
 - disattenzione a passaggi normativi fondamentali o pregnanti (verifica dell'efficacia –non solo dell'efficienza- dei DPI-u; confronto con i valori di legge sommando l'incertezza estesa) e, viceversa, presenza di calcoli con nessun valore preventivo (es.: “verifica del rispetto dei VLE” anche quando inutile, cioè per $L_{EX} < 87 \text{ dB(A)}$) o in presenza di DPI-u efficienti);
 - utilizzo di termini che generano confusione (in primis: gli inutili “ L_{EX} a DPI-u indossati” o simili²⁴ di cui sopra) o concettualmente errati (in primis: “classe di rischio: oltre i VLE”, dato che, ammesso che esista, dovrebbe essere rimosso immediatamente senza di certo starlo a scrivere sulla relazione);
 - determinazione di L_{EX} di attività, che poi in nessun punto del DVR sono ricondotte ai nominativi dei lavoratori, il che induce incertezza/confusione sulle misure di prevenzione concrete da assegnare ai singoli lavoratori;

²³ In compenso molte relazioni tecniche riportano risibili richiami alle “pause fisiologiche”

²⁴ vedi paragrafo 2.3 di questa stessa relazione

- inopinata proliferazione di misurazioni fonometriche senza alcun valore preventivo (in primis L_{Aeq} in uffici, ma anche molti inutili “ L_{Aeq} di centro ambiente”);
- determinazione dei L_{EX} a partire da banche-dati, soprattutto in edilizia e agricoltura, non consentite dalla legge;
- numero di misurazioni inferiore alle previsioni delle normative tecniche di cui si dichiara il rispetto;
- eccessiva brevità dei tempi di misurazione;
- errore di posizionamento del microfono (eccessiva distanza dalla sorgente rispetto alla distanza effettiva dell'orecchio)
- mancata misurazione dei livelli di picco.
- Quadro di rischio non aggiornato rispetto alla situazione acustica presente. Il problema è ovviamente critico quando il quadro di rischio è sottostimato;
- Relazioni tecniche prolisse, inutilmente complicate, certamente inadatte ad essere documento operativo a livello aziendale;
- Informazione e formazione a lavoratori e preposti che risultano solo di “facciata” (del rumore si parla solo per ricordargli di mettersi gli ottoprotettori);
- Assente o tardiva informazione del medico competente al datore di lavoro degli intervenuti peggioramenti della funzionalità uditiva evidenziati in lavoratori a seguito della sorveglianza sanitaria.

5 - COSA CI SI DOVREBBE ASPETTARE

Riassunto delle puntate precedenti.

In definitiva e in positivo, la legislazione propone una Valutazione del rumore che, in particolare:

- sia gestita dal datore di lavoro previa consultazione del RLS, avvalendosi del RSPP (con l'eventuale servizio di prevenzione e protezione) e della collaborazione del medico competente;
- si riferisca a una realtà aziendale nella quale sono già state attuate tutte le misure tecniche e organizzative per il controllo del rischio;
- ricostruisca²⁵ i livelli di esposizione al rumore con un approccio cautelativo, avvalendosi cioè di tempi credibili, riferiti alla settimana ricorrente a massimo rischio²⁶, e di misurazioni altrettanto credibili, riferite a quelle attività o situazioni presenti nella settimana presa a riferimento. In alternativa, che utilizzi il percorso previsto dall'art.191;
- verifichi, almeno qualitativamente, la presenza dei fattori accentuanti il rischio (contestuale esposizione a ototossici, vibrazioni, rumori impulsivi);
- indichi le aree con $L_{Aeq} > 85$ da segnalare/perimetrale/delimitare all'accesso e le attrezzature di lavoro su cui apporre apposita segnaletica di pericolo;

²⁵ per gli esposti oltre i valori inferiori di azione ($L_{EX} > 80$ dB(A) / $L_{picco,C} > 135$ dB(C))

²⁶ la settimana ricorrente a massimo rischio contiene in sé (rappresenta correttamente) tanto il $L_{EX,8h}$ quanto il $L_{EX,w}$

- abbia valutato l'efficacia dei DPI-u in uso (valutazione che contiene il pre-requisito dell'efficienza) e stabilisca se sono corretti o vanno cambiati, individuando quelli adatti;
- si concluda con un programma²⁷ delle ulteriori misure necessarie, tenuto conto dei principi dell'art.192, comma 1, obbligatoriamente se sono presenti L_{EX} maggiori dei valori superiori di azione;
- in più, al bisogno, il DUVRI e nei cantieri PSC + POS.

In definitiva e in positivo, la legislazione sul rischio rumore propone che le aziende abbiano in essere azioni di prevenzione/protezione che, in particolare:

- si riferiscano a una realtà aziendale nella quale siano già state attuate tutte le misure tecniche e organizzative per il controllo del rischio e rispettino il programma delle ulteriori misure programmate;
- mettano a disposizione e sorveglino l'uso dei DPI-u nelle attività nei quali questi risultino necessari;
- trasferiscano ai lavoratori una reale informazione e formazione volta a motivarli ai corretti comportamenti di prevenzione relativamente all'uso delle attrezzature di lavoro e ai mezzi di protezione collettivi e individuali;
- controllino regolarmente la funzionalità audiometrica degli esposti e si attivino per perfezionare le misure di prevenzione e protezione qualora insorgessero peggioramenti nella loro funzionalità uditiva.

6 – MISSIONE INCOMPIUTA (FANTASCIENZA E ACUSTICA)

Dal comodo studio di dipendente pubblico²⁸, per altro nell'immanenza del pensionamento, ho cercato di trarre qualche conclusione spendibile in particolare per i consulenti, per i datori di lavoro e per i miei colleghi che avranno il compito di cimentarsi nel palco della vita professionale dei prossimi anni.

Ho cercato l'equivalente delle 3 leggi della robotica di Asimov²⁹ relative all'acustica, ma ammetto di aver fallito.

Non esistono le 3 leggi finali dell'acustica applicate alla sicurezza sul lavoro, o almeno io non sono riuscito a formularle.

Mi sono convinto che non esistano conclusioni semplici sino a che la vita e la società, fenomeni che ritengo più complessi della robotica, avranno futuro e a questo livello di conoscenza è probabilmente opportuno accontentarsi di sproloqui³⁰ quale questo mio di oggi.

²⁷ cosa c'è da fare, in che tempi e chi ne cura la realizzazione

²⁸ in realtà oggi è domenica, il 26 aprile 2015, e sto lavorando da casa

²⁹ 1. A robot may not injure a human being or, through inaction, allow a human being to come to harm;
2. A robot must obey any orders given to it by human beings, except where such orders would conflict with the First Law;
3. A robot must protect its own existence as long as such protection does not conflict with the First or Second Law;

³⁰ discorso lungo e inutile, e/o non coerente, ma accattivante, che qui nel modenese viene annualmente pronunciato dalla famiglia Pavironica (Sandrone, Pulonia e Sgorghiguelo) in occasione del "giovedì grasso"

Mi auguro che la mia vita professionale non abbia penalizzato qualcuno rispetto ad altri, mi auguro di aver risposto regolarmente e correttamente alle richieste di informazioni da più parti ricevute, di aver in generale contribuito alla tutela della salute e della sicurezza sui luoghi di lavoro.

E, per ulteriori chiarimenti, rivolgetevi a qualcun altro o a o.nicolini@libero.it³¹.

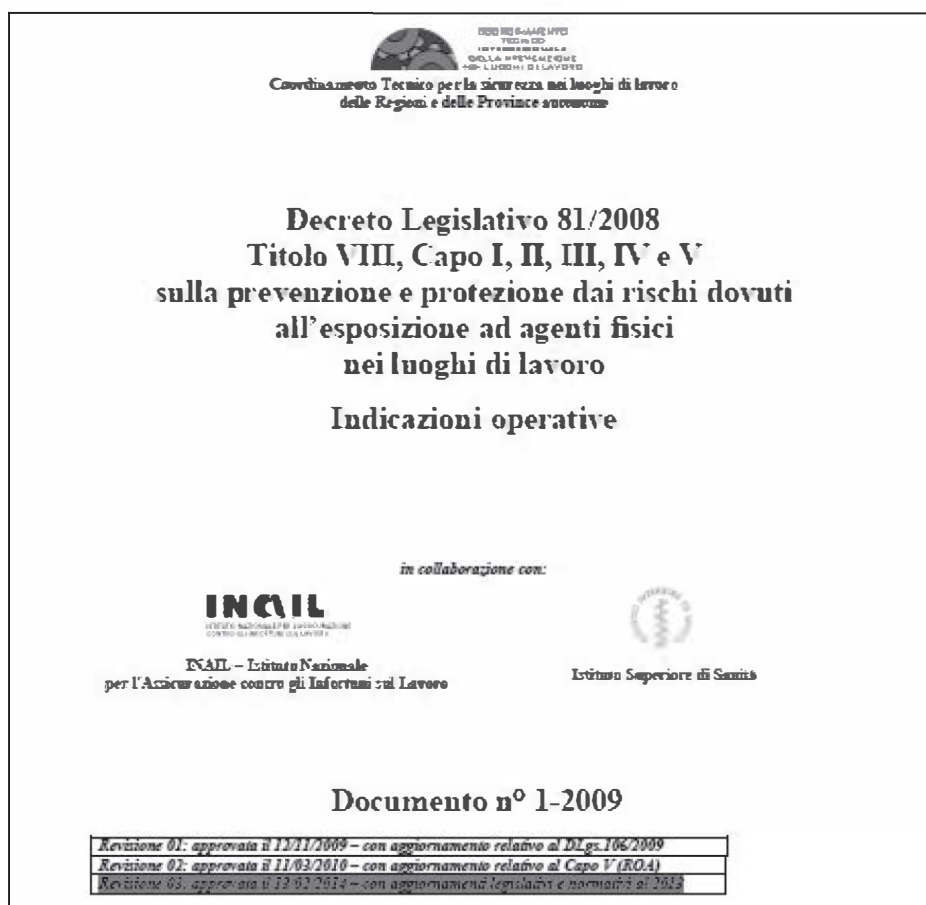


Figura 4: www.ausl.mo.it/dsp/ct_interregionale

Rigraziamenti

Ringrazio i miei professori e i compagni di classe dell'Istituto Tecnico Industriale E.Fermi di Modena con i quali, più ancora che all'Università, ho consolidato le connotazioni di conoscenza e incoscienza con cui ho affrontato la vita professionale. Ringrazio Rita e Viola che mi hanno accompagnato e sostenuto da sempre. Senza una famiglia così, anche la mia acustica avrebbe avuto una minore ampiezza.

³¹ Vi suggerisco comunque le Indicazioni Operative mostrate in **Figura 4**

7 - BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA ESSENZIALE

- 1 - *“Decreto legislativo 9 aprile 2008 n.81 – Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n.123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro”*; pubblicato sulla G.U.R.I. Serie Generale N. 101 del 30/04/2008, Supplemento Ordinario n.108/L e disponibile nella sua versione aggiornata su internet all'indirizzo: <http://www.lavoro.gov.it/SicurezzaLavoro/Pages/home.aspx>
- 2 - *“Decreto Legislativo 81/2008, Titolo VIII, Capo I, II, III, IV e V sulla prevenzione e protezione dai rischi dovuti all'esposizione ad agenti fisici nei luoghi di lavoro. Indicazioni operative”*; documento approvato il 13/02/2014 dal Coordinamento tecnico interregionale prevenzione nei luoghi di lavoro e disponibili su internet all'indirizzo: http://www.ausl.mo.it/dsp/ct_interregionale
- 3 - *“Metodologie e interventi tecnici per la riduzione del rumore negli ambienti di lavoro”*; documento approvato il 30/11/2012 dalla Commissione Consultiva ex art.6, DLgs.81/2008, e disponibile all'indirizzo: www.lavoro.gov.it/SicurezzaLavoro/PrimoPiano/Pages/20121130_Manuale_riduzione_rumore_lavoro.asp
- 4 - UNI EN ISO 9612:2011 *“Acustica - Determinazione dell'esposizione al rumore negli ambienti di lavoro - Metodo tecnico progettuale”*, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano marzo 2011
- 5 - UNI 9432:2011 *“Acustica - Determinazione del livello di esposizione personale al rumore nell'ambiente di lavoro”*, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano marzo 2011
- 6 - UNI 11347:2015 *“Acustica - Programmi aziendali di riduzione dell'esposizione a rumore nei luoghi di lavoro”*, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano febbraio 2015
- 7 - O.Nicolini, P.Nataletti, I.Pinto, P.Rossi, *“Agenti fisici sul lavoro: lo sviluppo di banche dati per la valutazione del rischio”*; Il Sole 24Ore; Supplemento Ambiente e Sicurezza n. 8 del 27 aprile 2010.

SOLUZIONI TECNICHE PER LA RIDUZIONE DEL RISCHIO RUMORE

Pietro Nataletti⁽¹⁾, Riccardo Vallergera⁽²⁾, Domenico Magnante⁽²⁾

¹: INAIL, Dipartimento Medicina, Epidemiologia, Igiene del Lavoro e Ambientale, Monte Porzio Catone (Roma)

²: INAIL, Consulenza Tecnica Accertamento Rischi e Prevenzione, Roma

1 - IL CONTROLLO DEL RUMORE NEL D.Lgs.81/2008

Come noto, il D.Lgs. 81/2008 e s.m.i. [1], in continuità con il precedente D.Lgs. 626/94 e con la legislazione prevenzionistica europea, stabilisce l'obbligo generale per il datore di lavoro di eliminare alla fonte o di ridurre al minimo, tenuto conto del progresso tecnico e della disponibilità di misure di controllo, i rischi di esposizione al rumore durante il lavoro. In altre parole, viene confermato il preciso rango di priorità da adottare nelle misure: interventi di prevenzione primaria (eliminazione del rischio), prevenzione secondaria (riduzione del rischio), protezione collettiva e protezione individuale. In particolare, l'articolo 192, – *Misure di prevenzione e protezione* – afferma:

“1. Fermo restando quanto stabilito dall'art.182, il datore di lavoro elimina i rischi alla fonte o li riduce al minimo mediante le seguenti misure:

- a) adozione di altri metodi di lavoro che implicano una minore esposizione al rumore;*
- b) scelta di attrezzature di lavoro adeguate, tenuto conto del lavoro da svolgere, che emettano il minor rumore possibile, inclusa l'eventualità di rendere disponibili ai lavoratori attrezzature di lavoro conformi ai requisiti di cui al titolo III, il cui obiettivo o effetto è di limitare l'esposizione al rumore;*
- c) progettazione della struttura dei luoghi e dei posti di lavoro;*
- d) adeguata informazione e formazione sull'uso corretto delle attrezzature di lavoro in modo da ridurre al minimo la loro esposizione al rumore;*
- e) adozione di misure tecniche per il contenimento:*
 - 1) del rumore trasmesso per via aerea, quali schermature, involucri o rivestimenti realizzati con materiali fonoassorbenti;*
 - 2) del rumore strutturale, quali sistemi di smorzamento o di isolamento;*
- f) opportuni programmi di manutenzione delle attrezzature di lavoro, del luogo di lavoro e dei sistemi sul posto di lavoro;*
- g) riduzione del rumore mediante una migliore organizzazione del lavoro attraverso la limitazione della durata e dell'intensità dell'esposizione e l'adozione di orari di lavoro appropriati, con sufficienti periodi di riposo.”*

Questo primo comma, nel riaffermare il principio prevenzionistico della eliminazione o riduzione dei rischi alla fonte, in combinato disposto con l'art. 182 – *Disposizioni miranti ad eliminare o ridurre i rischi*, si caratterizza per la perentorietà in merito al divieto di superamento dei valori limite di esposizione e per l'indicazione di specifici provvedimenti di prevenzione tecnica di sicura utilità pratica per il datore di lavoro. L'articolo prosegue con altri tre commi:

“2. Se a seguito della valutazione dei rischi di cui all'articolo 190 risulta che i valori superiori di azione sono oltrepassati, il datore di lavoro elabora ed applica un programma di misure tecniche e organizzative volte a ridurre l'esposizione al rumore, considerando in particolare le misure di cui al comma 1.

3. I luoghi di lavoro dove i lavoratori possono essere esposti ad un rumore al di sopra dei valori superiori di azione sono indicati da appositi segnali. Dette aree sono inoltre delimitate e l'accesso alle stesse è limitato, ove ciò sia tecnicamente possibile e giustificato dal rischio di esposizione.

4. Nel caso in cui, data la natura dell'attività, il lavoratore benefici dell'utilizzo di locali di riposo messa a disposizione dal datore di lavoro, il rumore in questi locali è ridotto a un livello compatibile con il loro scopo e le loro condizioni di utilizzo.”

Il successivo art. 193 – *Uso dei dispositivi di protezione individuali*, conferma che solo *“nei casi in cui i rischi derivanti dal rumore non possono essere evitati con le misure di prevenzione e protezione di cui all'art. 192, fornisce i dispositivi di protezione individuali per l'udito (DPI-u).....”*.

Proseguendo, l'articolo 194 - *Misure per la limitazione dell'esposizione* - recita:

“1. Fermo restando l'obbligo del non superamento dei valori limite di esposizione, se, nonostante l'adozione delle misure prese in applicazione del presente titolo, si individuano esposizioni superiori a detti valori, il datore di lavoro:

- a) adotta misure immediate per riportare l'esposizione al di sotto dei valori limite di esposizione;*
- b) individua le cause dell'esposizione eccessiva;*
- c) modifica le misure di protezione e di prevenzione per evitare che la situazione si ripeta.”*

2 - MODALITÀ DI ATTUAZIONE DEGLI OBBLIGHI DI PREVENZIONE

Si ricorda che il combinato disposto degli articoli del Titolo VIII D.Lgs. 81/2008 con altri articoli del Titolo I ha chiaramente inserito l'obbligo di misure per l'eliminazione o la riduzione al minimo del rischio rumore all'interno della valutazione del rischio e individuato i meccanismi aziendali che devono presiedere l'individuazione, l'attuazione e il mantenimento nel tempo degli interventi di prevenzione e protezione.

L'art. 28 – *Oggetto della valutazione dei rischi* – recita infatti al comma 2: *“Il documento di cui all'articolo 17, comma 1, lettera a), redatto a conclusione della valutazione..., devecontenere:*

- a) *una relazione sulla valutazione di tutti i rischi per la sicurezza e la salute durante l'attività lavorativa, nella quale siano specificati i criteri adottati per la valutazione stessa.....;*
- b) *l'indicazione delle misure di prevenzione e di protezione attuate e dei dispositivi di protezione individuali adottati, a seguito della valutazione di cui all'articolo 17, comma 1, lettera a);*
- c) *il programma delle misure ritenute opportune per garantire il miglioramento nel tempo dei livelli di sicurezza;*
- d) *l'individuazione delle procedure per l'attuazione delle misure da realizzare, nonché dei ruoli dell'organizzazione aziendale che vi debbono provvedere, a cui devono essere assegnati unicamente soggetti in possesso di adeguate competenze e poteri; ...”.*

Come si può vedere, vi è un preciso richiamo alle misure di prevenzione e protezione attuate, alle procedure per l'attuazione di tali misure e ai ruoli aziendali che vi debbono provvedere, i quali devono essere in possesso di adeguate competenze e poteri; tali misure devono trovare quindi una precisa collocazione all'interno del DVR.

L'art. 29 – *Modalità di effettuazione della valutazione dei rischi*, precisa le modalità di aggiornamento delle misure di prevenzione in caso di rielaborazione del DVR. Infatti, il comma 3 recita: *“La valutazione dei rischi deve essere immediatamente rielaborata, nel rispetto delle modalità di cui ai commi 1 e 2, in occasione di modifiche del processo produttivo o della organizzazione del lavoro significative ai fini della salute e sicurezza dei lavoratori, o in relazione al grado di evoluzione della tecnica, della prevenzione o della protezione o a seguito di infortuni significativi o quando i risultati della sorveglianza sanitaria ne evidenzino la necessità. A seguito di tale rielaborazione, le misure di prevenzione debbono essere aggiornate. Nelle ipotesi di cui ai periodi che precedono il documento di valutazione dei rischi deve essere rielaborato, nel rispetto delle modalità di cui ai commi 1 e 2, nel termine di trenta giorni dalle rispettive causali.”*

Gli articoli 181 e 190 del D.Lgs. 81/2008, riguardanti rispettivamente la valutazione dei rischi generali da esposizione ad agenti fisici e la valutazione del rischio rumore, ribadiscono nello specifico gli obblighi inerenti le misure di prevenzione e protezione.

Il comma 3 dell'art. 181 recita infatti: *“Il datore di lavoro nella valutazione dei rischi precisa quali misure di prevenzione e protezione devono essere adottate....”*. Il comma 5 dell'art. 190 ribadisce: *“La valutazione di cui al comma 1 individua le misure di prevenzione e protezione necessarie ai sensi degli articoli 192, 193, 194, 195 e 196 ed è documentata in conformità all'articolo 28, comma 2.”*

Per quanto riguarda la concreta attuazione tecnico-operativa degli obblighi previsti, il D.Lgs. 81/2008, secondo una prassi giuridica oramai consolidata secondo la quale la legislazione sul lavoro fissa solo i principi generali e i valori di riferimento, rimanda molto chiaramente alle norme tecniche e alle buone prassi. Nel caso degli agenti fisici, l'art. 181 recita in proposito al comma 1: *“Nell'ambito della valutazione di cui all'articolo 28, il datore di lavoro valuta tutti i rischi derivanti da*

esposizione ad agenti fisici in modo da identificare e adottare le opportune misure di prevenzione e protezione con particolare riferimento alle norme di buona tecnica ed alle buone prassi.”

3 - IL PIANO DEGLI INTERVENTI TECNICI E ORGANIZZATIVI

L'art. 192, comma 2 del D.Lgs. 81/2008, stabilisce l'obbligo di delle aziende di formalizzare il piano degli interventi tecnici e organizzativi volti a ridurre l'esposizione al rumore. Inoltre, il comma 3 dello stesso articolo dispone anche l'obbligo della segnaletica, della delimitazione e della limitazione d'accesso alle aree rumorose. Entrambi questi obblighi scattano al superamento dei valori superiori di azione (85 dB(A) di L_{EX} e/o 137 dB(C) di picco). Nel documento di valutazione dei rischi (DVR) ex art. 28 deve essere quindi presente il programma di tutte le misure tecniche e organizzative previste dall'art. 192, commi 2 e 3, nel caso di tutte le aziende che hanno anche un solo lavoratore esposto o un'area di lavoro in cui i lavoratori possono essere esposti al di sopra dei valori superiori di azione. Tale programma deve indicare chiaramente gli interventi tecnici che devono essere realizzati, con l'indicazione delle figure aziendali preposte alla realizzazione, al controllo dell'efficienza nel tempo, alla manutenzione e allo smaltimento di tali interventi. Come indicazione metodologica tale programma dovrebbe contenere almeno i seguenti elementi:

- elenco dei lavoratori e delle attività per i quali si è riscontrato in fase di valutazione del rischio il superamento dei valori superiori di azione;
- le misure tecniche e organizzative che si intendono adottare, tenuto conto delle esigenze di sicurezza (del personale, delle macchine, dei prodotti), della produzione e dell'ambiente che devono essere garantite;
- i risultati attesi degli interventi in termini di diminuzione dei livelli di esposizione L_{EX} e/o $L_{picco,C}$;
- i tempi di attuazione di ogni singola misura;
- la funzione aziendale e la persona/e incaricata/e di attuare le singole misure;
- modalità di verifica dei risultati acustici (è consigliabile che il tecnico preposto sia diverso da quello che ha realizzato le misure), di controllo dell'efficienza acustica nel tempo, di manutenzione e di smaltimento a fine vita dell'intervento.

Ora, a più di vent'anni dal D.Lgs. 626/94 e a 7 anni dall'emanazione del D.Lgs. 81/2008, appare dall'analisi dei DVR aziendali riguardanti il rumore che il grado di attuazione di questi obblighi è ancora carente, con un approccio spesso generico riguardo le misure tecniche e le modalità della loro attuazione e, di contro, si registra un ricorso ai DPI-u eccessivo e surrettizio da parte dei datori di lavoro come unica misura tecnica concretamente attuata.

Tutto ciò, nonostante già da diversi anni è disponibile una ricca produzione di norme tecniche, linee guida e buone prassi in grado di assistere i datori di lavoro e i loro consulenti nell'attuazione operativa delle misure di prevenzione tecnica. Si pensi, ad esempio: alla serie delle norme UNI EN ISO 11690 [2, 3, 4] e alla recente UNI 11347 [5]; al Manuale operativo “Metodologie e interventi tecnici per la riduzione

del rumore negli ambienti di lavoro” [6], realizzato nel 2005 dalle Regioni e dall'Ispesl, aggiornato e validato nel 2012 dalla Commissione Consultiva Permanente (ex art. 6 del D.Lgs. 81/2008) e ripubblicato dall'INAIL; alle FAQ sulla corretta applicazione del D.Lgs. 81/2008 [7].

Inoltre, negli ultimi anni, gli interventi tecnici di prevenzione sono supportati economicamente dagli incentivi di sostegno alle imprese con i quali l'INAIL finanzia in conto capitale le spese sostenute per progetti di miglioramento dei livelli di salute e sicurezza nei luoghi di lavoro. Gli avvisi pubblici, dai 60 milioni di euro del 2010 sono passati ai 307 milioni del 2013 e anche con l'avviso 2014 saranno erogati oltre 267 milioni di euro.

Anche le somme finanziate in conto capitale sono aumentate, passando dal 50% fino a un massimo di 50.000 euro del 2010 al 65% fino a un massimo di 130.000 euro del 2013 e 2014.

Gli avvisi pubblici sono stati annualmente modificati nei requisiti tecnici con l'intento di migliorarne la fruibilità da parte delle aziende e guidarle nel contempo a realizzare interventi progressivamente più efficaci.

La documentazione relativa ai diversi anni è pubblicata sul portale INAIL [12] unitamente al tutorial sull'utilizzo della procedura informatica e alle FAQ riguardanti le principali problematiche tecniche e amministrative.

Per quanto concerne specificamente il rischio rumore, come si può vedere nella Tabella 1, dal 2010 al 2013 i progetti di prevenzione sono stati più di 450 per un importo complessivo richiesto di oltre 30 Milioni di Euro. Nella stessa Tabella sono riportati anche i dati relativi ai progetti di finanziamento per la riduzione del rischio vibrazioni trasmesse al sistema mano-braccio (HAV) e al corpo intero (WBV).

Tabella 1: Finanziamenti richiesti all'INAIL negli anni 2010-2013 (Fonte: INAIL)

Bando ISI	PT	IT	PR	IR	PHAV	IHAV	PWBV	IWBV
2010	1.065	58,4	56	3,2	-	-	-	-
2011	3.579	197,9	161	10	39	1,9	212	14,3
2012	2.559	145,2	101	6,8	32	1,5	230	14,4
2013	3.563	290	139	12,7	71	4,5	373	35,1

Legenda: PT progetti totali presentati
 IT importi totali richiesti, in Milioni di Euro
 PR progetti rumore presentati
 IR importi rumore richiesti, in Milioni di Euro
 PHAV progetti mano-braccio presentati
 IHAV importi mano-braccio richiesti, in Milioni di Euro
 PWBV progetti corpo intero presentati
 IWBV importi corpo intero richiesti, in Milioni di Euro

In realtà gli importi effettivamente finanziati sono inferiori a quelli indicati in tabella, in quanto in alcuni casi le aziende hanno deciso di non dare corso alla realizzazione dei progetti e in altri l'intervento non ha superato le fasi di verifica amministrativa e tecnica.

Si nota inoltre che, percentualmente, gli importi impegnati dalle aziende per la realizzazione di progetti volti alla riduzione del rischio rumore non hanno seguito l'incremento delle somme messe a disposizione nei vari anni.

I progetti finanziati si sono concentrati maggiormente nella sostituzione di macchine e solo in alcuni casi hanno riguardato interventi ambientali sulla trasmissione e propagazione del rumore.

4 - LA NORMA UNI 11347:2015 SUI PROGRAMMI AZIENDALI DI RIDUZIONE DEL RUMORE

L'UNI ha emanato la norma tecnica UNI 11347:2015 "*Acustica – Programmi aziendali di riduzione dell'esposizione a rumore nei luoghi di lavoro*" [5], che ha sostituito l'omonimo Rapporto Tecnico UNI/TR 11347:2010 dopo un periodo sperimentale di cinque anni. Tale norma si pone l'obiettivo di specificare e indicare gli interventi tecnici e organizzativi che verranno adottati dall'azienda per ridurre l'esposizione al rischio, nonché come identificare le aree di lavoro a maggior rischio al fine della loro delimitazione/segnalazione/restrizione all'accesso, attraverso la redazione di un programma aziendale di riduzione dell'esposizione a rumore (PARE). La norma si pone a supporto dell'art. 192 del D.Lgs. 81/2008 e a livello tecnico integra e completa le UNI EN ISO 9612:2011 [8] e UNI 9432:2011 [9] sulla determinazione dell'esposizione professionale al rumore. L'indice essenziale del documento è il seguente:

Introduzione

1. Scopo e campo di applicazione
 2. Riferimenti normativi
 3. Termini e definizioni
 4. Requisiti del PARE
 - 4.1 Generalità
 - 4.2 Obiettivi
 - 4.3 Processo operativo
 - 4.4 Formato del PARE e delle schede riassuntive dei singoli interventi
 - 4.5 Gestione dell'attuazione del PARE
- Appendice A – Indicazioni orientative sulla scelta degli interventi tecnici di controllo del rischio rumore
- Appendice B – Valutazioni orientative sull'efficacia degli interventi tecnici di controllo del rischio rumore e dei costi delle soluzioni
- Appendice C – Requisiti professionali del personale qualificato
- Bibliografia

La norma consiglia che il PARE, a partire dai risultati delle misurazioni e della conseguente classificazione in fasce di rischio dei lavoratori, contenga gli obiettivi acustici e le modalità tecniche e organizzative per il loro raggiungimento (punto 4.3.2.1):

- l'elenco dei macchinari, delle attività e dei lavoratori in relazione ai quali si è riscontrato, in sede di valutazione del rischio, il superamento dei valori superiori di azione;
- le misure tecniche e organizzative che si intendono adottare a mezzo di soluzioni tecniche, progetti, costi di ciascun intervento, ecc.;
- i risultati che si attendono dopo gli interventi, in termini di diminuzione dei livelli di esposizione L_{EX} e/o L_{picco} (beneficio atteso);
- i tempi di esecuzione di ogni singolo intervento;
- la misura dei risultati ottenuti;
- l'identificazione dalla persona che nell'ambito dell'azienda (responsabile aziendale) si occuperà dell'attuazione dei singoli interventi;
- le modalità di verifica dei risultati acustici ottenuti a seguito dell'intervento, di controllo dell'efficienza acustica nel tempo, di manutenzione e di smaltimento, a fine vita, dell'intervento.

A completamento dell'intervento di riduzione del rischio, è consigliabile che il PARE preveda un intervento informativo e formativo, destinato ai lavoratori, per illustrare le novità introdotte nelle attrezzature e sui macchinari, negli ambienti di lavoro, nelle procedure e nelle operazioni manutenzione.

Il PARE è consigliabile che contenga inoltre i seguenti elementi di sintesi (punto 4.4.2):

- un'intestazione (che si può omettere se il PARE è contenuto nel DVR);
- delle schede di sintesi delle situazioni di rischio;
- un prospetto riassuntivo degli interventi programmati;
- delle schede illustrative dei singoli interventi riportati nel prospetto riassuntivo.

Come indicazione metodologica, nell'identificazione delle modalità di riduzione del rischio debbono essere considerati innanzitutto gli interventi che riducono il rumore alla sorgente, quindi quelli che lo riducono lungo il percorso di propagazione ed, infine, quelli che agiscono direttamente sulla postazione di lavoro.

La norma rammenta che la progettazione dell'intervento deve essere tale da evitare ulteriori rischi per la sicurezza (ad esempio il rischio incendio) e per la salute (ad esempio minor ricambio d'aria) verso i lavoratori e/o problemi igienico-sanitari verso il prodotto (ad esempio nel settore alimentare), ovvero maggiori rischi verso i recettori esterni; da ultimo esso fornisce indicazioni sulle caratteristiche professionali e formative, nonché delle disponibilità strumentali, del *personale qualificato* designato alla progettazione e realizzazione degli interventi riportati nel PARE.

Le modalità di riduzione dell'esposizione sono suddivise in due categorie: interventi organizzativi (interventi per la riduzione dell'esposizione o per la promozione degli interventi che riducono il rischio) ed interventi tecnici ((interventi per la riduzione del rumore emesso, trasmesso o ricevuto dal lavoratore).

Esempi di interventi organizzativi:

- modifica della distribuzione delle postazioni di lavoro o ristrutturazione del ciclo produttivo, al fine di evitare la presenza concomitante di più attività rumorose in spazi ristretti;
- adozione di procedure per la tumazione del personale addetto alle lavorazioni rumorose, al fine di minimizzare il tempo di esposizione individuale;
- adozione di apposita segnaletica di sicurezza, perimetrazione e limitazione all'accesso per i non addetti ai lavori nelle aree con livelli superiori al secondo livello di azione;
- informazione e formazione dei lavoratori al fine di garantire l'utilizzo delle macchine, l'applicazione dei metodi e delle procedure di lavoro per minimizzare l'esposizione al rumore.

Esempi di interventi tecnici:

- schermatura delle attività rumorose;
- riduzione del rumore alla sorgente, mediante regolazione dei parametri o delle modalità di funzionamento delle apparecchiature (es.: adozione di sistemi per la riduzione al minimo delle altezze di caduta dei pezzi in lavorazione);
- adozione di sistemi antivibranti per la riduzione del rumore trasmesso per via solida;
- riduzione del rumore alla sorgente, mediante insonorizzazione (silenziatori, cappottature) delle macchine/attrezzature più rumorose;
- riduzione del riverbero ambientale, mediante pannelli o baffles fonoassorbenti ;
- creazione di zone di permanenza dei lavoratori isolate dal rumore (cabine di riposo acustico).

I criteri generali che debbono guidare nella scelta di un intervento sono:

- 1) definizione di un ordine di priorità;
- 2) considerazione di tutte le conseguenze dell'intervento;
- 3) considerazione dell'interazione tra l'intervento progettuale proposto ed il processo produttivo dell'azienda;
- 4) valutazione del rapporto costi/benefici, ovvero scelta dell'intervento che, a parità di costi e nel rispetto dei punti precedenti, garantisca il massimo di attenuazione possibile per i lavoratori esposti.

La norma consiglia, per la valutazione del *rapporto costi-benefici* (punto 4.3.2.3), il calcolo del rapporto η :

$$\eta = \frac{c}{\sum_{i=1}^n \Delta dBi^*_{nl}} \quad \text{€/dB}$$

dove:

- c è il costo dell'opera (comprensivo di tutte le voci di spesa: messa in opera, collaudo, manutenzione, ecc.);

- ΔdB_i è l'attenuazione, in dB, assicurato dall'intervento ad un i -esimo gruppo di lavoratori;
- n_i è il numero di lavoratori dell' i -esimo gruppo;
- N è il numero di gruppi di lavoratori che ottengono un beneficio acustico.

La soluzione ottimale è quella alla quale corrisponde il valore minimo di η .

Si rimanda, per ulteriori informazioni, alla consultazione del Manuale operativo "*Metodologie e interventi tecnici per la riduzione del rumore negli ambienti di lavoro*" [6], in particolare la Scheda 30 del Secondo livello del Manuale, contenente più di 50 schede tecniche di interventi di bonifica sul campo organizzati secondo il seguente indice:

- C1. Interventi sulle sorgenti
- C2. Coperture totali o parziali
- C3. Sistemi schermanti
- C4. Trattamenti fonoassorbenti
- C5. Sistemi silenzianti
- C6. Cabine per operatore
- C7. Sistemi antivibranti
- C8. Interventi sul *lay-out*
- C9. Sistemi per l'edilizia

5 - CONCLUSIONI

Dopo 7 anni dalla sua prima emanazione e le modifiche correttive e integrative apportate e il contemporaneo dibattito di merito (tecnico, scientifico, giuridico,...), il D.Lgs. 81/2008 si può considerare a regime. Questo vale in particolare per il rumore, anche alla luce della messa a regime anche della normativa tecnica, linee guida e buone prassi a supporto dell'attuazione operativa degli obblighi di tutela della salute e sicurezza dei lavoratori derivanti dall'esposizione al rumore [10].

Ciò nonostante, il rumore continua a essere una delle prime cause di malattia professionale in Italia, come risulta dalle statistiche INAIL [11]. A parere degli scriventi, uno dei motivi risiede nell'ancora scarso ricorso delle aziende agli interventi tecnici e organizzativi per eliminare o ridurre il rischio rumore, soprattutto nei casi di superamento dei valori superiori di azione stabiliti dal D.Lgs. 81/2008 (85 dB(A) di L_{EX} e/o 137 dB(C) di picco).

Dal punto di vista tecnico-operativo e tecnologico, non sussistono più limitazioni di sorta, per cui in generale si possono attuare interventi tecnici di riduzione del rumore in quasi tutti i comparti e processi lavorativi. L'unica limitazione può risiedere nel costo economico delle bonifiche, indubbiamente generalmente non esiguo. La possibilità di ricorrere agli incentivi ISI dell'INAIL dovrebbe essere un fattore di stimolo per le imprese, ma lo scarso tasso di progetti presentati (vedi Tabella 1) indica una difficoltà le cui cause andranno indagate. Il completamento dei progetti finanziati e delle relative fasi di verifica tecnica per i primi avvisi (2010 e 2011) ha consentito l'avvio dell'analisi di dettaglio delle tipologie di intervento e delle relative ricadute in termini di salute e sicurezza nei luoghi di lavoro.

6 - BIBLIOGRAFIA

1. Decreto Legislativo 9 aprile 2008, n. 81 “Attuazione dell’articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro”, G.U.R.I. N. 101 del 30.4.2008, S.O. N. 108/L, e s.m.i. Testo coordinato aggiornato a dicembre 2014 disponibile sul sito del Ministero del Lavoro all’indirizzo: <http://www.lavoro.gov.it/DC6C703A-4953-4796-8D57-5D1698A0D64C/FinalDownload/DownloadId-12736DBF1C587D680503FE1FD9529B53/DC6C703A-4953-4796-8D57-5D1698A0D64C/SicurezzaLavoro/MS/Normativa/Documents/TU%2081-08%20-%20Ed.%20Dicembre%202014.pdf>.
2. Norma UNI EN ISO 11690-1:1998 “Acustica – Raccomandazioni pratiche per la progettazione di ambienti di lavoro a basso livello di rumore contenenti macchinario. Strategie per il controllo del rumore”, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano settembre 1998
3. Norma UNI EN ISO 11690-2:1999 “Acustica – Raccomandazioni pratiche per la progettazione di ambienti di lavoro a basso livello di rumore contenenti macchinario. Provvedimenti per il controllo del rumore”, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano marzo 1999
4. Norma UNI EN ISO 11690-3:2000 “Acustica – Raccomandazioni pratiche per la progettazione di ambienti di lavoro a basso livello di rumore contenenti macchinario. Propagazione del suono e previsione del rumore in ambienti di lavoro”, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano novembre 2000
5. Norma UNI 11347:2015 “Acustica – Programmi aziendali di riduzione dell’esposizione a rumore nei luoghi di lavoro”, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano 2015
6. Manuale operativo “Metodologie e interventi tecnici per la riduzione del rumore negli ambienti di lavoro” pubblicato su stampa e distribuito in 1.000 copie. Questo Manuale costituisce l’edizione riveduta e aggiornata al D.Lgs. 81/2008 della versione del 2005 ed è stato approvato dalla Commissione consultiva permanente presso il Ministero del Lavoro e pubblicato il 30.11.2012 sul sito internet del Ministero all’indirizzo: http://www.lavoro.gov.it/SicurezzaLavoro/PrimoPiano/Pages/20121130_Manuale_riduzione_rumore_lavoro.aspx.
Disponibile anche sul sito dell’INAIL, all’indirizzo: http://www.inail.it/internet_web/wcm/idc/groups/internet/documents/document/ucm_085834.pdf
7. Decreto Legislativo 81/2008 Titolo VIII, Capo I, II, III, IV e V sulla prevenzione e protezione dai rischi dovuti all’esposizione ad agenti fisici nei luoghi di lavoro . Indicazioni operative. Aggiornamenti del 12/11/2009, del 11/3/2010 e del 13/02/2013, redatte dal Coordinamento Tecnico per la sicurezza nei luoghi di lavoro delle Regioni e delle Province autonome in collaborazione con l’Ispesl, l’INAIL e l’ISS. Pubblicate sul sito della Az. USL di Modena all’indirizzo: http://www.ausl.mo.it/dsp/ct_interregionale.

8. Norma UNI EN ISO 9612:2011 “*Acustica - Determinazione dell'esposizione al rumore negli ambienti di lavoro*”, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano giugno 2011
9. Norma UNI 9432:2011 “*Acustica - Determinazione del livello di esposizione personale al rumore nell'ambiente di lavoro*”, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano giugno 2011
10. R. Sabatino, M. del Gaudio, P. Nataletti, “*La valutazione del rischio rumore*”, Monografia INAIL, Roma 2015 (in corso di stampa)
11. INAIL, Relazione annuale 2013, Roma 9 luglio 2014
12. Disponibile anche sul sito dell'INAIL, all'indirizzo:
<http://www.inail.it/internet/default/INAILincasodi/Incentiviperlasicurezza/BandoIsi2014/Tutorial/index.html>

VIBRAZIONI IMPULSIVE TRASMESSE AL CORPO INTERO: DATI EPIDEMIOLOGICI E AGGIORNAMENTI NORMATIVI

Massimo Bovenzi

Università degli Studi di Trieste – Dipartimento di Scienze Mediche,
Chirurgiche e della Salute – Unità Clinica Operativa di Medicina del Lavoro

Introduzione (1)

Per proteggere la salute dei lavoratori esposti a WBV, la Direttiva EU sulle vibrazioni meccaniche ha stabilito valori di azione e valori limite di esposizione espressi in termini di $A(8)$ (ms^{-2} r.m.s.) o VDV ($\text{ms}^{-1.75}$), calcolati dal valore più elevato delle accelerazioni ponderate in frequenza (ISO 2631-1) lungo gli assi x , y , e z [$A(8)_{\max}$, VDV_{\max}]

Valutazione dell'esposizione a WBV (ISO 2631-1)

- Metodo r.m.s.**

$$a_{r.m.s.} = \left[\frac{1}{T} \int_{t=0}^{t=T} a^2(t) dt \right]^{1/2}$$

$$a_{ws} = (1.4a_{wx}^2 + 1.4a_{wy}^2 + a_{wz}^2)^{1/2}$$

$$A(8)_{max} = \left(\sum_i a_{wsi(max)}^2 \times \frac{t_{di}}{T_{(8)}} \right)^{1/2} \quad (ms^{-2} \text{ r.m.s.})$$

- Metodo r.m.q.**

$$a_{r.m.q.} = \left[\frac{1}{T} \int_{t=0}^{t=T} a^4(t) dt \right]^{1/4}$$

$$a_{wq} = (1.4a_{wx}^4 + 1.4a_{wy}^4 + a_{wz}^4)^{1/4}$$

$$VDV_{max} = a_{wq(max)} \times (t_{di} \times 60 \times 60)^{1/4} \quad (ms^{-1.75})$$

Direttiva Europea 2002/44/EC D.Lgs. 81/2008

- Valore di esposizione che fa scattare l'azione**

$$A(8)=0.5 \text{ ms}^{-2} \text{ r.m.s.}$$

$$VDV=9.1 \text{ ms}^{-1.75}$$

- Valore limite di esposizione**

$$A(8)=1.15 \text{ ms}^{-2} \text{ r.m.s. (EU); } 1.0 \text{ ms}^{-2} \text{ r.m.s. (Italia)}$$

$$VDV=21 \text{ ms}^{-1.75}$$

Coorte VIBRISKS

- 537 autisti di macchine movimentazione terra (n=124), carrelli elevatori (n=169), e veicoli di pubblica utilità (n=244)
- Studio trasversale e follow up di due anni.
- Dati personali, occupazionali e sanitari indagati con il questionario strutturato VIBRISK (www.vibrisks.soton.ac.uk)

Misura delle vibrazioni

Macchine/veicoli	Accelerazione r.m.s. ponderata in frequenza (ms^{-2})			
	a_{wx}	a_{wy}	a_{wz}	a_v
Sollevatore gommato (n=7)	0.21	0.25	0.35	0.57
Escavatore (n=4)	0.24	0.20	0.52	0.69
Carrello elevatore (n=27)	0.19	0.17	0.52	0.64
Trattore portuale (n=3)	0.29	0.30	0.49	0.76
Gru mobile (n=5)	0.06	0.07	0.29	0.32
Bus (n=12)	0.07	0.09	0.30	0.34

Incidenza cumulativa di lombalgia (ultimi 7 gg.)
negli autisti senza sintomi allo studio trasversale

Sintomi	Autisti (n=202)
Lombalgia	78 (38.6%)
Durata del dolore (gg.)	
0	124 (61.4%)
1 – 6	49 (24.2%)
≥ 7	29 (14.4%)
Intensità del dolore (NRS)	
0	124 (61.4%)
1 – 5	44 (21.8%)
6 – 10	34 (16.8%)
Disabilità (scala R&M)	
0	132 (65.3%)
1 – 12	41 (20.3%)
13 – 24	29 (14.4%)

Associazione tra lombalgia e misure di
esposizione giornaliera a WBV negli autisti

Misura di esposizione	Durata del dolore OR (IC 95%)	Intensità del dolore OR (IC 95%)	Disabilità OR (IC 95%)
$A(8)_{\max}$ (ms^{-2} r.m.s.)	1.0 (-)	1.0 (-)	1.0 (-)
<0.25	2.19 (1.13-4.25)	1.70 (0.89-3.26)	1.73 (0.88-3.40)
0.25-0.30	1.58 (0.82-3.03)	1.51 (0.79-2.86)	1.56 (0.81-3.00)
>0.30	P=0.061	P=0.23	P=0.22
$A(8)_{\text{sum}}$ (ms^{-2} r.m.s.)	1.0 (-)	1.0 (-)	1.0 (-)
<0.3	2.32 (1.22-4.44)	2.38 (1.24-4.55)	4.08 (1.31-12.7)
0.3-0.4	1.64 (0.82-3.29)	1.79 (0.89-3.60)	2.58 (0.94-7.05)
>0.4	P=0.012	P=0.008	P=0.0001
VDV_{\max} ($\text{ms}^{-1.75}$)	1.0 (-)	1.0 (-)	1.0 (-)
<6.0	2.79 (1.39-5.58)	3.17 (1.59-6.36)	4.94 (1.39-17.5)
6.0-9.1	2.44 (1.16-5.15)	2.77 (1.31-5.88)	4.14 (1.12-15.3)
>9.1	P=0.0095	P=0.0025	P=0.0008
VDV_{sum} ($\text{ms}^{-1.75}$)	1.0 (-)	1.0 (-)	1.0 (-)
<6.5	2.84 (1.42-5.68)	3.22 (1.61-6.44)	6.45 (1.53-27.1)
6.5-10.5	2.70 (1.27-5.71)	3.05 (1.43-6.50)	5.74 (1.27-25.9)
>10.5	P=0.006	P=0.0016	P=0.0003

Distribuzione degli autisti in rapporto
ai valori di azione per esposizione a WBV

Misura di esposizione a WBV		Autisti (n=202)
$A(8)_{\max}$ (ms^{-2} r.m.s.)	<0.5	179 (88.6)
	>0.5	23 (11.4)
$A(8)_{\text{sum}}$ (ms^{-2} r.m.s.)	<0.5	154 (76.2)
	>0.5	48 (23.8)
VDV_{\max} ($\text{ms}^{-1.75}$)	<9.1	137 (67.8)
	>9.1	65 (32.2)
VDV_{sum} ($\text{ms}^{-1.75}$)	<9.1	122 (60.4)
	>9.1	80 (39.6)

Conclusioni (1)

- La misura $A(8)_{\max}$ mostra la più debole associazione con il sintomo lombalgia quando confrontata con le altre misure di esposizione giornaliera a WBV
- Una rilevante proporzione di autisti sarebbe esclusa dai programmi di sorveglianza sanitaria qualora venisse adottata la misura $A(8)_{\max}$ per la valutazione dell'esposizione a WBV

ISO/CD 2631-5

Valutazione del rischio per WBV con shock ripetuti

- **Modello 1:**

- Accelerazioni di picco $< 9.81 \text{ ms}^{-2}$ ($< 1 \text{ g}$)
- Frequenza delle vibrazioni tra 0.01 e 80 Hz

- **Modello 2:**

- Accelerazioni di picco tra 9.81 e 137.3 ms^{-2} ($1 - 4 \text{ g}$)
- Frequenza delle vibrazioni tra 0.01 e 80 Hz

Introduzione (2)

- In un documento del comitato tecnico dell'ISO/TC 108/SC 4/WG 15 (2014), è stato proposto un metodo per stimare le **forze intraspinali** derivanti dall'esposizione a WBV con shock ripetuti
- La predizione della risposta lombare alle WBV viene stimata mediante modelli dinamici basati sul metodo degli elementi finiti (***dynamic Finite Element (FE) models***) anatomicamente adattati alle caratteristiche antropometriche e la postura dei lavoratori esposti a WBV

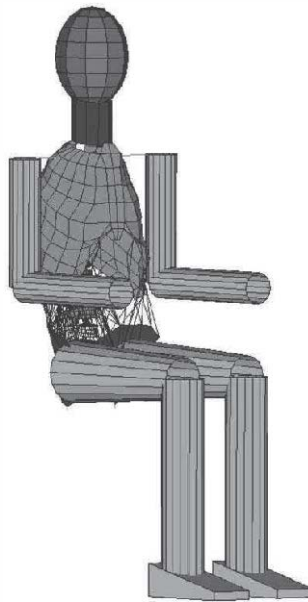


Fig. 1. Dynamic human FEM model.

Calcolo delle forze vertebrali interne

$$f_{ap,la,ca}^{dl} = \sum_{el=1}^4 \sum_{ed=1}^3 ht_{ed,el}^{dl} \times a_{ed,el}$$

f = vettore delle forze a livello del disco $dl \in \{T12-L1, L5-S1\}$
in direzione antero-posteriore (ap), laterale (la) e verticale (ca)

ht = funzione di trasferimento tra accelerazione e forze vertebrali
a livello di $el \in \{natica=1, schiena=2, mani=3, piedi=4\}$
nelle direzioni $ed \in \{x=1, y=2, z=3\}$.

a = accelerazione al livello el nella direzione ed

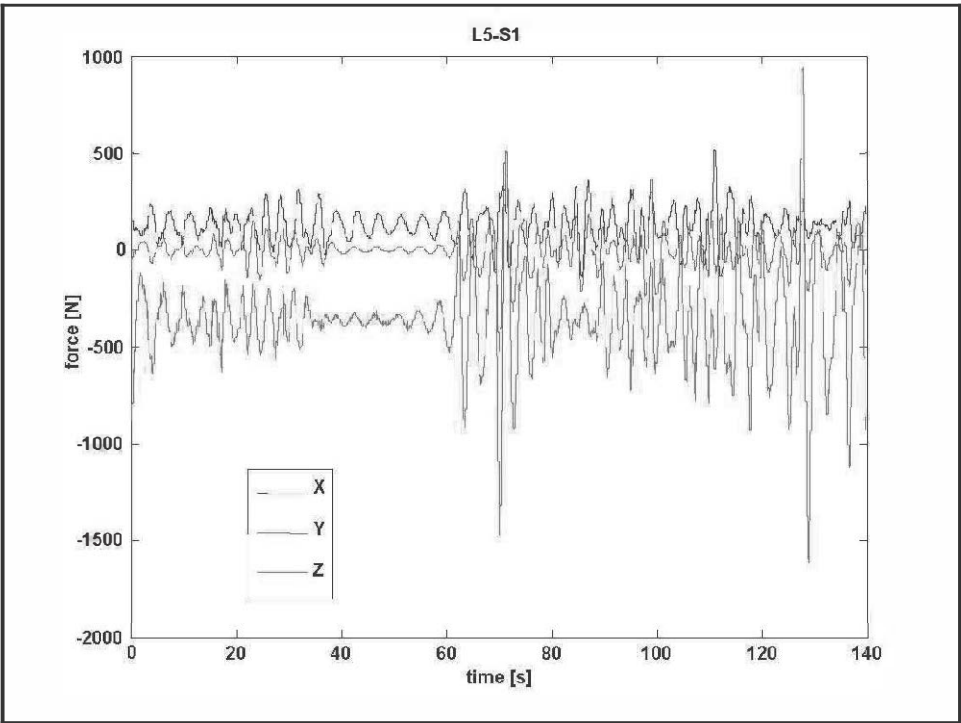
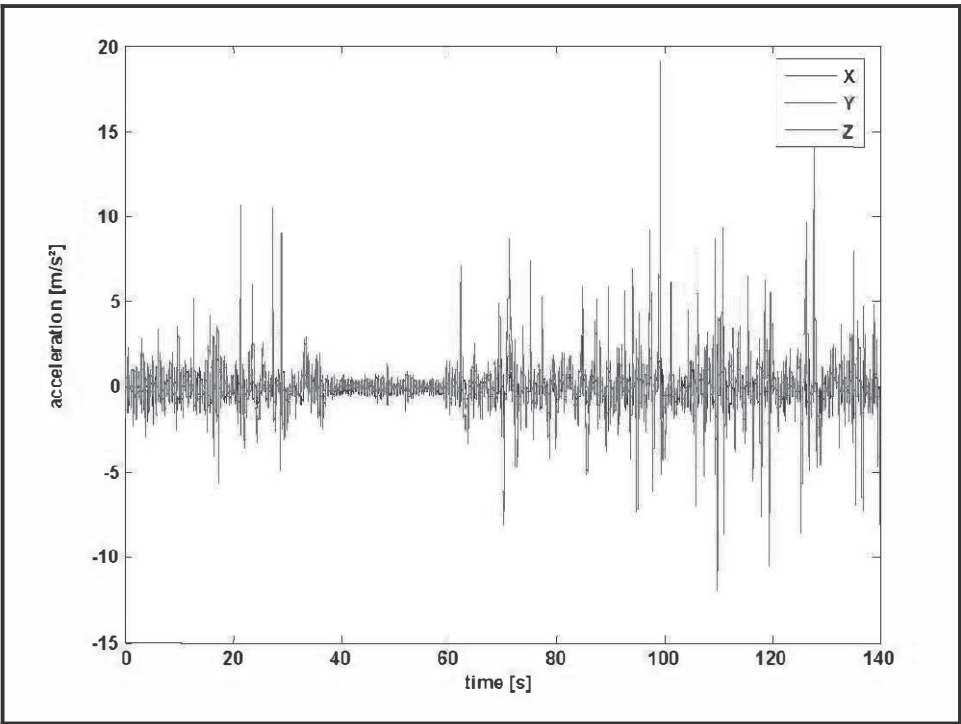
Nota: ht dipende dalla massa, il BMI e la postura del soggetto



Calcolo della *compressive dose*

$$S_i = \left[\sum_p \left(\frac{C_{dyn,p}}{100 A} \right)^6 \right]^{1/6}$$

La *compressive dose* S_i [MPa] è definita come la somma delle forze di picco $C_{dyn,p}$ [N] che agiscono sui piatti vertebrali di area A [cm²]



Valutazione del rischio (ISO 2631-5)

La valutazione del rischio si basa sul calcolo di:

• **“daily compressive dose” S_{ed} (MPa)**

• **“risk factor R ” (adimensionale)**

a partire dalla relazione esistente tra forze intraspinali statiche e dinamiche e le caratteristiche individuali del soggetto quali l'età, il body mass index, la postura e la durata di esposizione del soggetto esposto

Daily compressive dose

$$S_{ed} = \left(\sum_i S_i^6 \times \frac{t_{di}}{t_{mi}} \right)^{1/6} \quad (MPa)$$

- S_i è lo stress dinamico causato dalle vibrazioni generate dal veicolo i
- t_{di} è la durata giornaliera di esposizione alle vibrazioni del veicolo i
- t_{mi} è il tempo di misura durante il quale S_i è stato calcolato
- i è il numero di veicoli guidati

Risk factor R

$$R = \left[\sum_{j=1}^n \left(\frac{S_{ed} \times N_j^{1/6}}{S_{uj} - C_{stat}} \right)^6 \right]^{1/6}$$

- S_{ed} è la "daily compressive dose" (MPa)
- S_{uj} è la massima resistenza dei piatti intervertebrali (MPa) per un soggetto di età (b+j) ove b è l'età all'inizio dell'esposizione e j è la conta degli anni
- C_{stat} è lo stress compressivo statico dovuto alle forze gravitazionali in funzione del peso corporeo, il BMI e la postura del soggetto
- N è il numero di giornate di esposizione/anno
- n è il numero di anni di esposizione.



Valutazione del rischio per WBV con shock ripetuti

Esposizione occupazionale a WBV:
4 ore/die, 240 gg./anno, 45 anni di guida

Effetti patologici sul rachide lombare	S_{ed} (MPa)	R factor (unità)
Bassa probabilità	<0.5	<0.8
Alta probabilità	>0.8	>1.2

Studio VIBRISKS

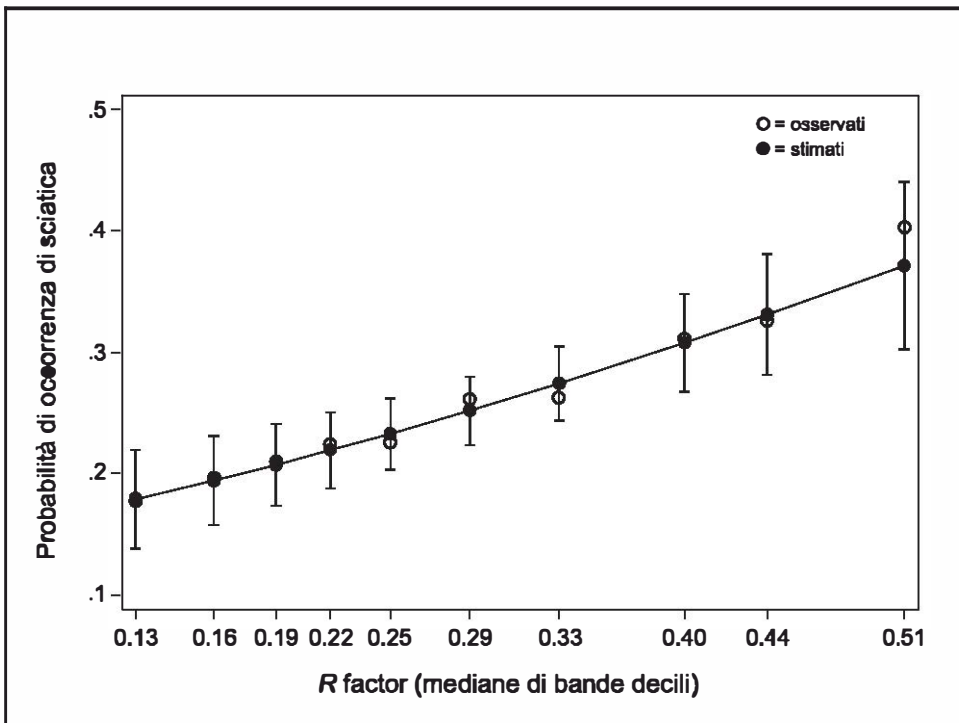
- Lo scopo era indagare l'occorrenza del sintomo **sciatica** nei precedenti 7 gg. e 12 mesi in autisti professionisti mediante uno studio di coorte prospettico
- Valutare la relazione tra sciatica e misure di **dose esterna** ($A(8)_{max}$, VDV_{max}) e di **dose interna** (S_{ed} , **R factor**) derivate dai database biodinamici ed epidemiologici dei rami italiano e tedesco del progetto di ricerca EU VIBRISKS

Risultati (2a)

Sintomi	Autisti (n=537)
Sciatica (7 gg.)	
Prevalenza	45 (8.4%)
Incidenza cumulativa	41 (8.3%)
Sciatica (12 mesi)	
Prevalenza	124 (23.1%)
Incidenza cumulativa	90 (21.8%)

Risultati (2b)

Predittore	Sciatica (7 gg.) aOR (IC 95%)	Sciatica (12 mesi) aOR (IC 95%)
$A(8)_{\max}$ ($\text{ms}^{-2} \times 10^{-1}$)	0.99 (0.85-1.16)	1.06 (0.94-1.18)
VDV_{\max} ($\text{ms}^{-1.75}$)	0.95 (0.89-1.02)	1.00 (0.95-1.04)
S_{ed} ($\text{MPa} \times 10^{-1}$)	1.31 (0.98-1.76)	1.30 (1.07-1.58)
R factor ($\text{unit\grave{a}} \times 10^{-1}$)	1.36 (1.12-1.66)	1.32 (1.15-1.52)



Conclusioni (2a)

Poichè la formula per il calcolo di **R factor** include non solo le forze dinamiche intraspinali indotte dalle WBV, ma anche variabili quali l'età, il BMI, la postura e la durata di esposizione a WBV, ne deriva l'importanza di questi ulteriori fattori di rischio nella etiopatogenesi degli effetti a lungo termine sul rachide lombare degli autisti esposti a WBV

Conclusioni (2b)

Lo studio di coorte prospettico effettuato nell'ambito del progetto VIBRISKS ha suggerito che misure di dose interna basate su modelli FE (S_{ed} , R factor) sembrano migliori predittori dell'occorrenza di sciatica in una popolazione di autisti professionisti rispetto alle misure di dose esterna ($A(8)_{max}$, VDV_{max}) stabilite dalla Direttiva EU sulle vibrazioni meccaniche

Conclusioni (2c)

- Nella coorte VIBRISKS, S_{ed} variava da **0.10** a **0.50 MPa**, e R factor da **0.07** a **0.72** unità.
- I limiti di esposizione suggeriti dall'ISO 2631-5 per una bassa probabilità di effetti nocivi per la salute ($S_{ed}<0.5$ MPa, R factor<0.8) o per una elevata probabilità di tali effetti ($S_{ed}>0.8$ MPa, R factor>1.2) derivano da studi biodinamici di laboratorio e non sono stati validati da studi epidemiologici.

Conclusioni (2d)

I risultati dello studio di coorte VIBRISKS suggeriscono che i valori limite dell'ISO 2631-5 per esposizione a vibrazioni con shock ripetuti tendono a sottostimare il rischio di lesioni al rachide lombare.

MISURE DI VIBRAZIONI FINALIZZATE ALLA RIDUZIONE DEI RISCHI

Alessandro Peretti

Scuola di Specializzazione in Medicina del Lavoro, Università di Padova

1 – PREMESSA

Le indagini negli ambienti di lavoro dovrebbero essere svolte al fine, non solo di valutare i livelli di esposizione dei lavoratori, ma anche di individuare i parametri che determinano i rischi in modo da poter ridurre al minimo i rischi stessi.

Perseguendo questi obiettivi si dovrebbero ampliare le metodologie d'indagine. Nel caso degli autobus urbani e dei carrelli elevatori considerati in questa relazione, andrebbero rilevate le vibrazioni sia sul piano del sedile di guida, sia sul suo basamento. A fianco delle misurazioni nelle normali condizioni di lavoro, andrebbero eseguiti rilievi in condizioni controllate, in modo da poter confrontare mezzi diversi e valutare parametri differenti.

2 – SEDILE DI GUIDA

2.1 – VALORE SEAT

Sui mezzi di trasporto e sulle macchine semoventi uno degli aspetti più importanti da prendere in considerazione è il sedile di guida che costituisce l'elemento di trasmissione delle vibrazioni al conducente. Esso è generalmente caratterizzato da una sospensione meccanica o pneumatica operativa lungo l'asse verticale.

Per valutare l'adeguatezza del sedile è necessario rilevare contemporaneamente le vibrazioni sul piano e sul basamento del sedile stesso. Oltre all'accelerometro inserito in un piatto semirigido di gomma per i rilievi sul piano del sedile, s'impiega un secondo accelerometro che va assicurato al basamento ad esempio mediante un magnete. Dividendo il valore quadratico medio (rms) dell'accelerazione ponderata in frequenza rilevata sul piano del sedile lungo l'asse verticale per il corrispondente valore riscontrato sul basamento, si ottiene il valore SEAT (*Seat Effective Amplitude Transmissibility*): un valore SEAT inferiore a 1 indica un'attenuazione esercitata dal sedile, un valore superiore a 1 un'amplificazione.

Il piatto semirigido di gomma contenente il trasduttore e il valore SEAT sono definiti

dalla norma UNI EN 30326-1 [1] che a sua volta si fonda sulla norma ISO 10326-1 [2].

Il valore SEAT fornisce un'indicazione circa l'idoneità del sedile rispetto al veicolo considerato, in termini complessivi e ponderati in tutto l'intervallo di frequenza in esame. Tale valore presenta però alcune criticità:

- dipende dal contenuto spettrale delle vibrazioni presenti sul basamento del sedile e quindi dipende dalle condizioni di prova e dal mezzo;
- è condizionato dal peso e dalla postura del conducente;
- è influenzato dai movimenti del conducente che possono determinare accelerazioni sul piano del sedile non correlate alle accelerazioni trasmesse dal basamento.

L'utilità del valore SEAT è comunque evidente dal punto di vista igienistico. Individuati i mezzi dotati di sedili inadeguati con valori SEAT significativamente superiori a 1 ed eventualmente confermato tale superamento in condizioni controllate, i sedili stessi andrebbero sottoposti a revisione o sostituiti.

A titolo di esempio si propongono due esperienze. La prima su 15 autobus urbani esaminati in condizioni di normale esercizio da capolinea a capolinea con i passeggeri a bordo [3]. Si è osservato che il sedile di 13 mezzi attenua le vibrazioni (SEAT compreso tra 0.70 e 1.00), mentre il sedile di 2 mezzi amplifica le vibrazioni (SEAT pari a 1.09 e 1.30). Nel caso migliore l'attenuazione è del 30%, nel caso peggiore l'amplificazione è del 30%.

La seconda esperienza riguarda 114 carrelli elevatori esaminati nelle normali condizioni di lavoro [4]. Nel 71% dei carrelli il sedile attenua le vibrazioni sino a ridurle a meno della metà (SEAT minimo 0.38); nel 29% dei carrelli il sedile amplifica le vibrazioni sino a incrementarle a più di una volta e mezza (SEAT massimo 1.53).

L'entità delle attenuazioni e delle amplificazioni determinate dal sedile può quindi risultare importante.

2.2 – TRASMISSIBILITÀ DELLE VIBRAZIONI

La trasmissibilità delle vibrazioni attraverso il sedile può essere valutata, non solo in termini complessivi e ponderati mediante il valore SEAT, ma anche spettralmente, dividendo frequenza per frequenza i valori rms dell'accelerazione non ponderata rilevata sul piano del sedile per i corrispondenti valori riscontrati sul basamento. Le accelerazioni si riferiscono come in precedenza all'asse verticale. Le analisi dei segnali accelerometrici vanno svolte in terzi di ottava. La curva che si ottiene è caratteristica del sedile, ossia è indipendente dalle condizioni di prova e dal mezzo, anche se, come prima, può essere influenzata dal peso, dalla postura e dai movimenti del conducente.

La curva di trasmissibilità permette di evidenziare l'intervallo di frequenza in cui il sedile amplifica le vibrazioni (tratto di curva superiore a 1), nonché il valore massimo di trasmissibilità; consente inoltre di individuare l'intervallo in cui il sedile attenua le vibrazioni (tratto di curva inferiore a 1).

Nel caso dei 15 autobus urbani già citati ed esaminati in condizioni di normale esercizio [3], il sedile determina generalmente un'amplificazione tra 2 e 6.3 Hz. Per valori superiori a 4-6.3 Hz il sedile attenua le vibrazioni in misura via via crescente, anche se in alcuni casi sono presenti picchi tra 16 e 50 Hz. In **Figura 1** sono riportati

a titolo di esempio i due spettri delle accelerazioni verticali rilevate sul piano e sul basamento del sedile, nonché la curva di trasmissibilità.

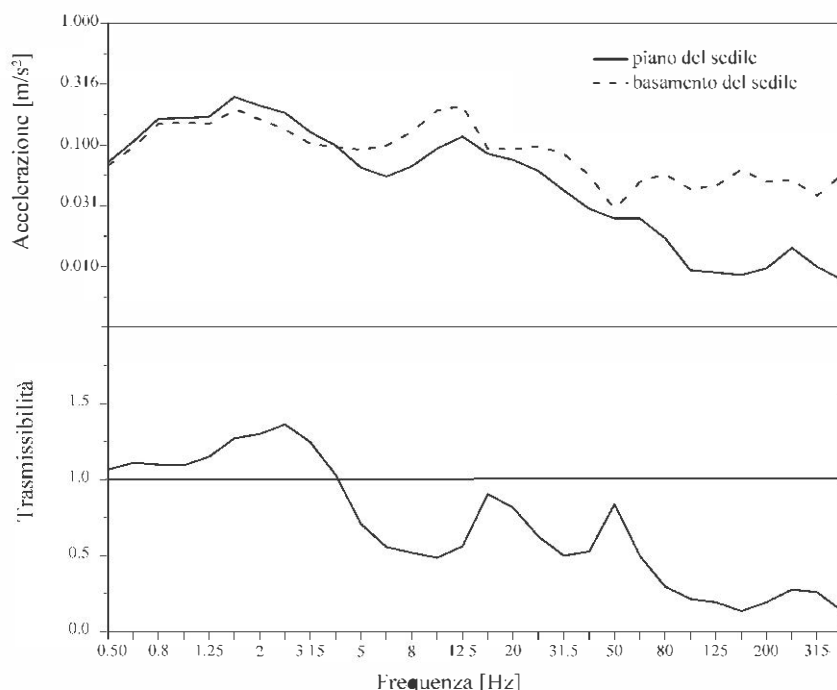


Figura 1: Spettri delle accelerazioni rms verticali e curva di trasmissibilità in un autobus urbano in normali condizioni di esercizio

Nel caso dei 114 carrelli elevatori già citati ed esaminati nelle normali condizioni di lavoro [4], il sedile determina in genere un'amplificazione tra 2.5 e 4 Hz. Per valori superiori a 4-6.3 Hz il sedile attenua le vibrazioni in misura via via crescente, anche se in numerosi casi è presente un picco a 16 o a 20 Hz.

Negli autobus e nei carrelli il comportamento dei sedili è quindi sostanzialmente analogo.

La curva di trasmissibilità di un sedile può essere rilevata non solo nelle normali condizioni di lavoro, ma anche in condizioni controllate ponendo il mezzo a velocità costante su un percorso rettilineo con superficie omogenea. In tale modo si possono ottenere dati maggiormente rappresentativi.

Le prove possono essere eseguite a più velocità. Alla guida dei mezzi va posto il medesimo conducente di massa nota; sulla base del peso del conducente va eventualmente regolata la rigidità della sospensione del sedile.

L'operatore deve avere cura di non praticare movimenti estemporanei durante la guida.

2.3 – OSSERVAZIONI

In merito ai sedili, la Direttiva Macchine [5] stabilisce che “se la macchina è sottoposta a vibrazioni, il sedile deve essere progettato e costruito in modo da ridurre al livello più basso ragionevolmente possibile le vibrazioni trasmesse all’operatore” (punto 1.1.8).

Nel caso dei carrelli, la norma UNI EN 13490 [6] definisce un metodo di laboratorio per la valutazione dell’efficacia della sospensione del sedile nel ridurre le vibrazioni trasmesse all’operatore. Le vibrazioni si riferiscono all’asse verticale e all’intervallo di frequenza 1-20 Hz. Secondo la norma, le indicazioni ottenute mediante questa procedura potrebbero essere impiegate dalle aziende produttrici di carrelli nella selezione dei sedili da installare sui propri mezzi.

Il metodo di prova descritto dalla norma UNI EN 13490 si fonda sulla norma ISO 10326-1 [2] che, più in generale, si riferisce ai sedili di differenti tipi di veicoli. Il metodo prevede che il sedile sia montato su una piattaforma sottoposta alle sollecitazioni prodotte da un generatore di vibrazioni. Le prove vanno svolte impiegando due soggetti di peso differente (rispettivamente, 52-55 e 98-103 kg); poiché la postura assunta può causare differenze del 10% nei risultati, sono definiti gli angoli in corrispondenza delle ginocchia e delle caviglie. In funzione della categoria del carrello, sono previste quattro tipologie di sollecitazioni spettrali che si basano su una grande quantità di misure ottenute sui carrelli in pesanti condizioni d’impiego.

A seconda della tipologia della sollecitazione, i valori SEAT ottenuti devono risultare inferiori ai valori 0.7, 0.8, 0.9.

Purtroppo nella maggior parte dei casi i produttori di sedili forniscono informazioni generiche e insufficienti in merito alla riduzione delle vibrazioni dei loro sedili. Eppure i valori SEAT rilevati in laboratorio dal produttore potrebbero fornire al tecnico igienista indicazioni immediate circa la validità del sedile.

Il tecnico igienista dovrebbe inoltre avere la possibilità di consultare la curva di trasmissibilità del sedile.

Misurate le accelerazioni presenti sul basamento del sedile del mezzo in esame e note quindi le caratteristiche in frequenza delle vibrazioni, la curva di trasmissibilità consentirebbe al tecnico igienista di valutare in modo più approfondito l’adeguatezza del sedile. Tale valutazione potrebbe essere svolta anche a priori, prima dell’installazione del sedile sul mezzo; riguardando più sedili, potrebbe permettere al tecnico igienista di individuare il sedile più idoneo per il mezzo in questione.

Il confronto della curva di trasmissibilità sperimentalmente rilevata dal tecnico igienista con quella fornita dal produttore consentirebbe infine di valutare se il sedile stesso mantiene le sue caratteristiche nel tempo o se va sottoposto a manutenzione.

3 – ANOMALIE DEL SEDILE O DEL MEZZO

Le misurazioni sul piano e sul basamento del sedile consentono di avere indicazioni su possibili anomalie.

Sempre nell’ambito dell’indagine sui 15 autobus urbani in condizioni di normale e-

esercizio [3] sono stati riscontrati valori atipici su 2 mezzi.

Rispetto alle vibrazioni rilevate sugli altri autobus, su un mezzo il valore dell'accelerazione rms ponderata in frequenza rilevata sull'asse longitudinale è risultato eccessivamente elevato sul piano del sedile (0.39 contro $0.13-0.26 \text{ m/s}^2$), mentre era normale sul basamento (0.12 contro $0.08-0.13 \text{ m/s}^2$). I risultati della prova deponevano per un'anomalia del sedile. Sostituito il sedile in officina ed eseguita nuovamente la misurazione sulla stessa linea, il valore dell'accelerazione sul piano del sedile diminuiva (0.23 m/s^2) sino a portarsi all'interno dell'intervallo caratteristico di tutti i mezzi, mentre sul basamento rimaneva inalterato (0.12 m/s^2).

Su un altro autobus si è soggettivamente avvertito durante la prova che le sospensioni del mezzo tendevano a giungere, in qualche caso, a fine corsa; d'altra parte il valore dell'accelerazione rms ponderata in frequenza verticale risultava elevato, sia sul piano del sedile (0.46 contro $0.26-0.44 \text{ m/s}^2$), sia sul basamento (0.47 contro $0.31-0.46 \text{ m/s}^2$). Risolto in officina il problema delle sospensioni ed eseguita nuovamente la prova sulla stessa linea, i valori dell'accelerazione tornavano bassi, sia sul sedile, sia sul basamento (rispettivamente 0.37 e 0.40 m/s^2).

Le indagini sperimentali possono quindi consentire l'individuazione di anomalie e affiancarsi alle attività di manutenzione nel tenere sedili e mezzi in condizioni adeguate. Non può quindi sfuggire il significato fortemente preventivo che possono avere le misurazioni.

4 – GRADUATORIE

Rilievi sui mezzi nelle medesime condizioni consentono di porre a confronto i mezzi stessi.

Nel caso degli autobus, i mezzi possono essere esaminati in condizioni controllate, a diverse velocità mantenute costanti su un percorso rettilineo con superficie asfaltata omogenea, senza passeggeri a bordo. Per garantire che tutti i mezzi procedano effettivamente sulla stessa superficie, le ruote devono sempre rimanere alla stessa distanza dal ciglio stradale. Alla guida dei diversi mezzi va posto sempre il medesimo conducente che, come già ricordato, deve evitare movimenti estemporanei durante la guida.

Da questo tipo di prove si ottengono graduatorie dei mezzi che possono risultare particolarmente importanti all'atto di nuovi acquisti da parte dell'azienda di gestione del servizio pubblico.

Nel caso dei carrelli elevatori, i mezzi possono essere esaminati in condizioni controllate a diverse velocità mantenute costanti sulle stesse superfici in cui sono normalmente impiegati (lastre in calcestruzzo all'interno dei capannoni, asfalto nel piazzale). Per confrontare tra loro mezzi differenti è come sempre necessario che la superficie su cui i mezzi traslano sia esattamente la stessa. Per tale motivo va segnato il percorso di prova (mediante gesso, nastro adesivo, ecc.) che andrà attentamente seguito da parte del conducente.

Anche in questo caso è possibile ottenere graduatorie utili in fase di acquisto o di noleggio dei carrelli da parte dell'azienda.

5 – RUOTE

Da prove sui carrelli in condizioni controllate è possibile acquisire indicazioni circa l'adeguatezza delle ruote, esaminando gli stessi carrelli dotati di ruote differenti.

A questo proposito va sottolineato che le ruote piene assicurano maggiore stabilità e garantiscono maggiore sicurezza rispetto agli pneumatici non subendo forature. Tra le ruote in gomma piena e dura (*cushion*) e le ruote in gomma piena con interno morbido e battistrada duro (*superelastiche*), sono da preferire queste ultime in quanto determinano vibrazioni minori, anche se vibrazioni ancora più basse sarebbero associate alle ruote a camera d'aria (*pneumatiche*) [7].

6 – VELOCITÀ

Mediante prove in condizioni controllate è possibile acquisire indicazioni in merito alla velocità massima cui far operare i carrelli elevatori.

In questo caso essi vanno esaminati a diverse velocità costanti su percorsi rappresentativi della pavimentazione presente nello stabilimento. I rilievi possono essere svolti a carrello scarico e carico. La velocità può essere calcolata sulla base della lunghezza del percorso e della durata cronometrata di percorrenza.

Misurate le accelerazioni, le rette di regressione che si ottengono consentono di individuare la velocità alla quale l'accelerazione diventa pari al valore di azione (0.5 m/s^2); nota la durata d'impiego dei carrelli è possibile anche tracciare rette di regressione relative all'esposizione A(8).

La velocità così individuata va quindi impostata come massima nella centralina di comando del carrello. L'importanza di questo tipo di valutazioni dal punto di vista della prevenzione del rischio è facilmente intuibile: si tratta di far operare i carrellisti in modo che il valore di azione non sia superato.

A titolo di esempio si riporta la **Figura 2** riguardante 3 carrelli ciascuno dei quali è stato esaminato sul proprio percorso a diverse velocità [4]. Le correlazioni tra velocità e vibrazioni verticali sono abbastanza buone. Si osservi che, nel caso dei carrelli, velocità di 5, 10, 15 km/h possono essere considerate, rispettivamente, basse, medie e alte.

Anche negli autobus sussiste correlazione tra velocità e vibrazioni verticali. La **Figura 3** riguarda 6 autobus posti in condizioni controllate alla velocità nominale di 20, 40 e 60 km/h sul medesimo percorso rettilineo asfaltato in buone condizioni superficiali [8]. Per ciascuna velocità sono stati eseguiti 5 rilievi. La velocità nominale è stata letta sul tachimetro di bordo; la velocità effettiva è stata calcolata sulla base della lunghezza del percorso (circa 1 km tra due segnali posti a bordo strada) e sulla base della durata intercorrente tra i passaggi in corrispondenza dei due segnali (rilevata mediante un cronometro a bordo del mezzo).

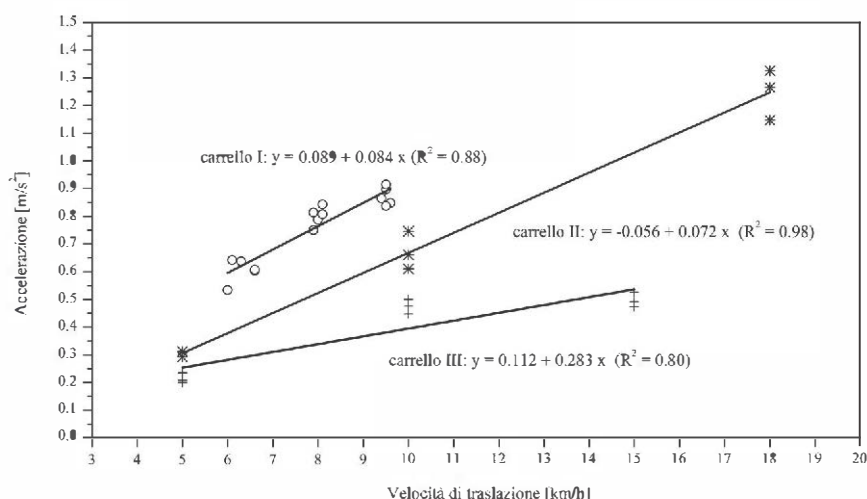


Figura 2: Rette di regressione relative ai valori dell'accelerazione rms ponderata in frequenza rilevata sul piano del sedile lungo l'asse verticale. I carrelli sono stati esaminati a diverse velocità di traslazione sul proprio percorso: carrello I, elettrico, scarico, su lastre di calcestruzzo in condizioni discrete; carrello II, diesel, carico, su asfalto in condizioni buone; carrello III, elettrico, carico, su asfalto in condizioni buone

7 – PAVIMENTAZIONE

Nel caso dei carrelli posti in condizioni controllate, le prove nei diversi reparti, nei magazzini e sul piazzale, consentono di evidenziare il grado di disuniformità delle pavimentazioni. Passando da condizioni buone a condizioni discrete o mediocri, le accelerazioni verticali aumentano in misura significativa.

I dati ottenuti potrebbero quindi costituire uno stimolo per ripristinare l'uniformità delle superfici.

A questo proposito va osservato che la pavimentazione dei capannoni è generalmente costituita da lastre di calcestruzzo, caratterizzate da giunti che tendono a deteriorarsi nel tempo; tra una lastra e l'altra vengono a crearsi, infatti, dei gradini che si sbrocciano a causa del passaggio dei carrelli.

Proprio tali gradini, insieme a crepe, fessure, riparazioni mal eseguite, tombini, ecc. sono la causa principale delle vibrazioni che si trasmettono al sedile del carrello. Ne deriva che una pavimentazione senza soluzioni di continuità (già in opera in alcune aziende), rivestita o impregnata con uno strato in resina epossidica o poliuretanic, può garantire uniformità della superficie e quindi bassi valori di vibrazioni.

Per quanto riguarda il manto asfaltato dei piazzali degli stabilimenti, esso dovrebbe essere tenuto in condizioni ottimali, mediante continua manutenzione e frequenti rifacimenti.

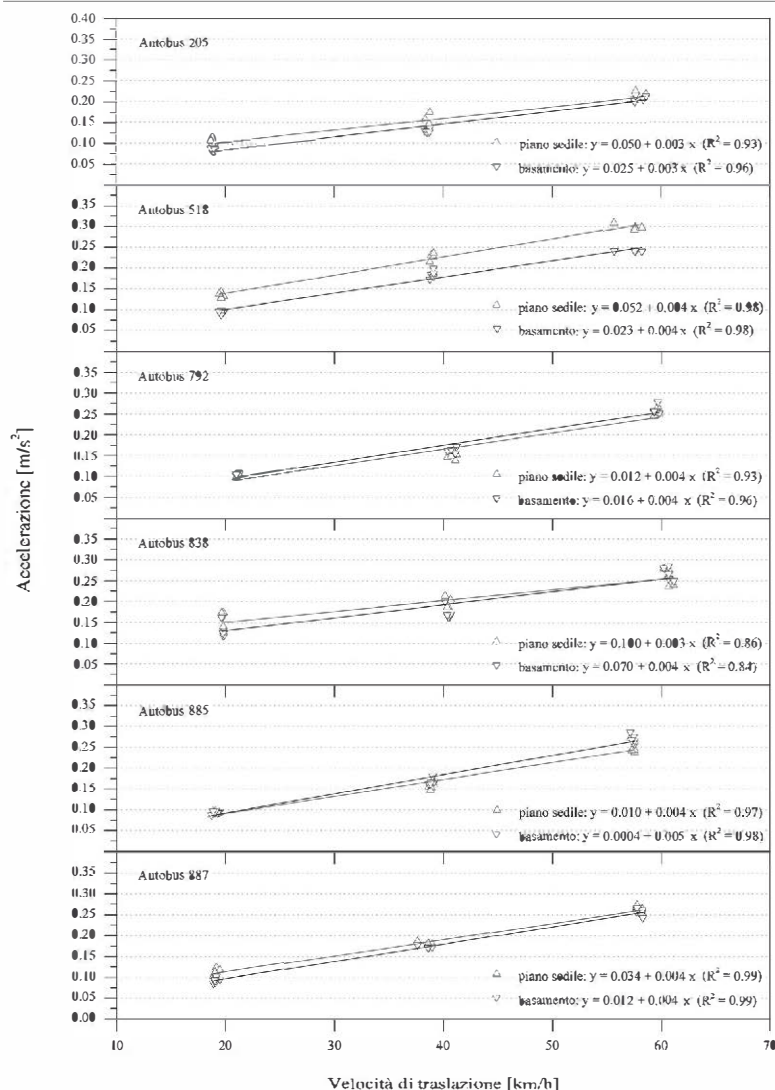


Figura 3: Rette di regressione riguardanti i valori dell'accelerazione rms ponderata in frequenza rilevata lungo l'asse verticale a 3 velocità nominali (20, 40, 60 km/h) su 6 autobus urbani posti sul medesimo percorso rettilineo asfaltato in buone condizioni superficiali

Particolare attenzione andrebbe posta in corrispondenza dei portoni, laddove l'alternanza tra le due tipologie di superfici (lastre all'interno dello stabilimento, asfalto all'esterno) crea generalmente un evidente scalino.

8 – MODALITÀ DI GUIDA

Le modalità di guida possono influire notevolmente sulle esposizioni.

A questo proposito è possibile citare la seguente esperienza [9]. Lo stesso carrello è stato esaminato in condizioni di lavoro simulate su un'area mista, asfaltata e in lastre di calcestruzzo, caratterizzata da superfici in condizioni mediocri, ponendo alla guida del mezzo, alternativamente, due conducenti con modalità di guida diverse (abituamente meno veloce uno, più veloce e brusco nelle operazioni l'altro). Facendo svolgere sullo stesso tragitto le medesime operazioni, si sono rilevate accelerazioni rms ponderate in frequenza verticali pari a 0.31 m/s^2 (primo operatore) e a 0.59 m/s^2 (secondo operatore). La velocità media era nel primo caso di 5.3 km/h , nel secondo di 8.7 km/h . Dato che il valore fatto registrare dal secondo operatore poteva far presupporre un rischio, l'operatore stesso è stato istruito in modo che operasse in modo più adeguato.

9 – CONCLUSIONI

La valutazione dei rischi non deve essere un esercizio formale fine a sé stesso con ricadute scarse o nulle in termini di prevenzione. Valutare non significa solo stimare i livelli di esposizione. Valutare significa anche conoscere in misura concreta e approfondita i rischi nelle specifiche realtà in cui si manifestano, individuando i parametri che li determinano. Solo così si potranno avviare programmi di riduzione al minimo dei rischi stessi.

10 - BIBLIOGRAFIA

- 1] UNI EN 30326-1, 2012. Vibrazioni meccaniche – Metodo di laboratorio per la valutazione delle vibrazioni sui sedili dei veicoli – Parte 1: Requisiti di base.
- 2] ISO 10326-1, 1992. Mechanical vibration – Laboratory method for evaluating vehicle seat vibration – Part 1: Basic requirements.
- 3] Peretti A., Bonomini F., Panetta G., Pasqua di Bisceglie A., Maso S., Bartolucci G.B. Vibrazioni e rumore al posto di guida di autobus urbani. Parte I: mezzi in condizioni di esercizio. Italian Journal of Occupational and Environmental Hygiene 2014; 5:4; 62-66.
- 4] Peretti A., Bonomini F., Pasqua di Bisceglie A. Carrelli elevatori: vibrazioni, esposizione dei conducenti, interventi di riduzione del rischio. Atti 75° Congresso Nazionale SIMLII, Brescia-Bergamo 17-19 ottobre 2012. G Ital Mod Lav Erg 2012, 34:3, 335-342.
- 5] Direttiva 2006/42/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 17 maggio 2006 relativa alle macchine e che modifica la direttiva 95/16/CE (rifusione).

- 6] UNI EN 13490, 2009. Vibrazioni meccaniche. Carrelli industriali. Valutazione in laboratorio e specifica delle vibrazioni trasmesse all'operatore dal sedile.
- 7] Saint-Eve P, Donati P. Prévention des risques dorso-lombaires liés à la conduite de chariots élévateurs. INRS 1993, DMT 54 TC 45, 141-148.
- 8] Peretti A., Bonomini F., Panetta G., Pasqua di Bisceglie A., Maso S., Bartolucci G.B. Vibrazioni e rumore al posto di guida di autobus urbani. Parte II: mezzi in condizioni di riferimento. Italian Journal of Occupational and Environmental Hygiene 2014; 5:4; 67-71.
- 9] Peretti A., Bonomini F., Pasqua di Bisceglie A. Vibrazioni sui carrelli elevatori: esposizione e contenimento dei rischi. Atti Convegno dBA incontri 2014. Modena 17/9/2014.

LA FORMAZIONE DEI PROFESSIONISTI SULL'ACUSTICA E LE VIBRAZIONI

Patrizio Fausti⁽¹⁾, Luigi Maffei⁽²⁾, Marco Carlo Masoero⁽³⁾, Nicolò Zuccherini Martello⁽¹⁾

¹: Università di Ferrara, Dipartimento di Ingegneria

²: Seconda Università degli Studi di Napoli, Dipartimento di Architettura e Disegno Industriale

³: Politecnico di Torino, Dipartimento di Energia

1 – INTRODUZIONE

L'obiettivo del presente lavoro è quello di fare il punto sulla formazione per lo svolgimento di attività professionale nel campo dell'acustica e delle vibrazioni. Il punto di vista è quello di una associazione scientifica, l'Associazione Italiana di Acustica (AIA) che si prefigge di promuovere e favorire lo studio dell'acustica e dei problemi ad essa inerenti nel campo scientifico, tecnico, normativo, industriale, sociale, professionale e didattico.

In queste brevi note ci si concentra principalmente su alcuni dei possibili ambiti di svolgimento dell'attività professionale in acustica (ambientale, edilizia, architettonica, industriale, sicurezza), tralasciando altri settori (musicale, informatico, elettronico, elettroacustico, subacqueo, fonetico, audiologico, etc), pur rilevanti ma meno legati alla figura professionale del "Tecnico in Acustica".

Per quanto riguarda la disciplina delle "vibrazioni", in queste note si fa riferimento sia alle interazioni con l'acustica (generazione e propagazione del rumore), sia al disturbo e alla sicurezza negli ambienti di lavoro.

Viene fornita inizialmente una breve sintesi della situazione attuale, con l'indicazione delle varie possibilità di formazione in acustica, a partire dall'insegnamento universitario, passando dai corsi di formazione professionalizzanti, fino ai corsi e seminari di aggiornamento per l'acquisizione dei crediti formativi professionali (CFP).

Vengono poi analizzati sinteticamente quelli che dovrebbero essere i contenuti minimi per la formazione di una figura professionale di "tecnico in acustica" di tipo generico, in grado di affrontare le problematiche acustiche di base nei principali settori, per poi accennare ai contenuti formativi per acquisire le conoscenze necessarie per operare con competenze specialistiche nei vari ambiti professionali. In questo lavoro non si parlerà delle problematiche legate alla figura del "tecnico competente in acustica ambientale" (TCAA), peraltro attuali anche per la Legge Europea 2013-bis del 30-10-2014, n° 161, che delega il governo, tra l'altro, ad adeguare la disciplina dell'attività e della formazione della figura professionale del tecnico competente in materia di acustica. Tuttavia, essendo il TCAA una figura professionale esistente, sarà richiamata in diverse occasioni.

2 –LA SITUAZIONE ATTUALE PER LA FORMAZIONE IN ACUSTICA E VIBRAZIONI

Chi vuole intraprendere la carriera di Acustico incontra generalmente un percorso tortuoso, che può partire dagli studi universitari fino ad approdare a master o dottorati, oppure come formazione post-laurea o post-diploma, con corsi professionalizzanti nei vari ambiti, soprattutto in quello ambientale.

2 . –CORSI, MASTER E DOTTORATI NELLA FORMAZIONE UNIVERSITARIA

In Italia non esiste ad oggi un percorso ben strutturato e orientato alla professione di Acustico, ma ci sono diversi atenei che hanno inserito l'acustica come materia di studio, soprattutto nell'Ingegneria, ma anche in Fisica ed Architettura. Non sempre, però, tali corsi risultano sufficienti ad affrontare la totalità delle problematiche dell'acustica applicata, dall'insonorizzazione di macchinari all'isolamento degli edifici, dall'acustica delle sale da concerto all'effetto del rumore e delle vibrazioni sulla salute dell'uomo. Nei pochi atenei in cui l'offerta didattica lo permette, la materia viene approfondita in corsi opzionali con contenuti più specialistici e con l'esecuzione di tesi di laurea.

Per quanto riguarda i master dedicati allo studio di materie collegate all'acustica, si hanno poche possibilità. Generalmente sono master annuali o biennali, con numero di ore pari a circa 450-500 annue, incluse attività di tirocinio. I più diffusi sono quelli rivolti all'ingegneria del suono.

Sicuramente il massimo grado di approfondimento in uno specifico settore dell'acustica, si può ottenere con un dottorato di ricerca. La possibilità di fare un dottorato di ricerca è soprattutto in quegli atenei dove ci sono gruppi di ricerca strutturati. Il tecnico in acustica che ha seguito un percorso di studi, partito con una tesi di laurea e poi proseguito con un master e/o con un dottorato è sicuramente molto specializzato, soprattutto nel settore di ricerca seguito.

2.2 – I CORSI DI FORMAZIONE PROFESSIONALIZZANTI

A seguito della richiesta formativa nel campo dell'acustica da parte di liberi professionisti, enti pubblici e aziende, alcune Università hanno organizzato corsi post-laurea o post-diploma, con attestazione dell'attività svolta (corsi di formazione o perfezionamento per diplomati e laureati con numero di ore variabili da 150 a 320) e con rilascio di un titolo universitario.

Parallelamente alle Scuole di Formazione Universitarie, vengono organizzati corsi di formazione, soprattutto per tecnici Competenti in Acustica Ambientale, da parte di Istituzioni ed Enti di Formazione pubblici e privati (ARPA di varie Provincie o Regioni, Ordini Professionali, Enti privati, etc).

Se da un lato il tipico corso per Tecnici Competenti in Acustica Ambientale, ha una struttura e un numero di ore abbastanza omogeneo (generalmente 160-200 ore ad eccezione dei corsi per la figura di TCAA per l'Emilia Romagna con almeno 300 ore [1]), molti altri corsi vengono organizzati con numero di ore molto ridotto e pertanto non idonei per la completezza della formazione. La situazione è pertanto

molto variegata: si va da corsi di 10 ore per “Certificatori in Acustica Edilizia” organizzati in e-learning a corsi per TCAA di 160-300 ore, passando per altre figure professionali quali ad esempio quella di “Tecnico Acustico Edile” di 60 ore, quella di “Esperto di acustica e vibrazioni negli ambienti di lavoro” con circa 110 ore, il corso di “Acustica e Controllo del rumore nei trasporti” con circa 140 ore, e il corso “Acustica Architettonica: dalla progettazione al collaudo finale” con circa 80 ore.

2.3 LA FORMAZIONE CONTINUA DEI PROFESSIONISTI

Con il D.P.R. 7 agosto 2012, n. 137, è stato introdotto l’obbligo per i professionisti del continuo e costante aggiornamento delle proprie competenze professionali. Tale formazione si espleta seguendo corsi, seminari, stage, conferenze, visite tecniche che rilasciano Crediti Formativi Professionali (CFP). Le modalità di acquisizione dei crediti sono definite dai consigli nazionali degli ordini o collegi che coordinano le singole figure professionali (Ingegneri, Architetti, Geometri, Geologi, Periti, etc).

Le attività di formazione continua e aggiornamento professionale possono essere organizzate, oltre che da ordini e collegi, anche da Enti, Associazioni e da altri soggetti, iscritti come provider previa autorizzazione dei consigli nazionali degli ordini o collegi, con parere favorevole del ministero di competenza. Le attività di formazione curate direttamente dagli ordini o collegi possono essere svolte in cooperazione con altri soggetti.

Anche l’AIA si è attivata in diverse occasioni per il rilascio di CFP in occasione di iniziative specifiche come seminari e convegni. Al momento si sta valutando la possibilità di registrarsi direttamente come provider di formazione per i consigli nazionali di ordini e collegi.

3 – LA FORMAZIONE E LE COMPETENZE NELL’AMBITO DELLA VALUTAZIONE DEL RISCHIO NEI LUOGHI DI LAVORO

Il D.Lgs. 81/2008 in tema di sicurezza nei luoghi di lavoro, dedica il TITOLO VIII ai rischi dovuti all’esposizione ad agenti fisici pericolosi, tra cui rumore e vibrazioni meccaniche. Nel citato Decreto è richiesto che la valutazione dei rischi sia effettuata da “personale qualificato nell’ambito del servizio di prevenzione e protezione e in possesso di specifiche conoscenze in materia” (art. 181 c. 2). Mancano tuttavia le indicazioni sulle “specifiche conoscenze” che dovrebbe avere il valutatore.

La Legge Quadro sull’inquinamento acustico, definisce tecnico competente “la figura professionale idonea ad effettuare le misurazioni, verificare l’ottemperanza ai valori definiti dalle vigenti norme”. Chi svolge la valutazione di rischio da esposizione a rumore e vibrazioni potrebbe essere dunque anche un tecnico in acustica, ma manca questa specificazione nel D.Lgs. 81/2008, lasciando aperta questa posizione a chiunque autonomamente ritenga di essere in possesso del blando requisito di avere “specifiche conoscenze in materia” [2].

L’ISPESL ha prodotto le “Linee guida per la valutazione del rischio rumore negli ambienti di lavoro” (2005) e successivamente l’INAIL ha pubblicato le “Metodologie e interventi tecnici per la riduzione del rumore negli ambienti di lavoro” (2009). Questi documenti costituiscono un valido ausilio per l’addetto alla

valutazione di rischio, ma sono rivolte a chi ha già competenze in acustica di base e conoscenze nel campo di strumenti e metodi di misura.

L'incertezza nella determinazione delle figure professionali abilitate alla valutazione dei rischi, lascia spazio ad una moltitudine di enti più o meno qualificati, che propongono corsi di formazione anche di sole 8 ore. I programmi di questi corsi sono piuttosto ambiziosi e forniscono (in teoria) nozioni base di acustica e vibrazioni, indicazioni sul quadro normativo, informazioni sulle sorgenti e sulle modalità di calcolo dei livelli, la valutazione del rischio ed eventuali interventi. Tra l'altro questi corsi non sono nemmeno obbligatori, come lo sono quelli per TCAA.

Questa anomalia della legislazione andrebbe rimossa in quanto, a fronte di indicazioni ben precise sui parametri e sui limiti, lascia spazio a diverse interpretazioni per quanto riguarda la figura che dovrà verificare tali limiti [2].

Risulta dunque necessaria una maggiore chiarezza nella definizione della figura professionale addetta alla valutazione di rischio da rumore e vibrazioni; sarebbe auspicabile che questa funzione sia svolta da un tecnico in acustica, che ha già le conoscenze di base in materia.

4 – REQUISITI MINIMI PER LA FORMAZIONE E COMPETENZE DEI PROFESSIONISTI IN ACUSTICA E VIBRAZIONI

L'acustica è una disciplina fortemente multidisciplinare, con applicazioni in diversi ambiti professionali. Per operare con professionalità, l'esperto in acustica deve avere conoscenze di base che raramente vengono acquisite nei percorsi scolastici tradizionali e, come visto, solo occasionalmente nella formazione universitaria. Queste conoscenze di base, indipendentemente dall'ambito professionale in cui opererà il professionista, per poter essere acquisite, richiedono un numero di ore di formazione adeguato.

In considerazione del fatto che la disciplina è la stessa anche se si opera in ambiti diversi e che la strumentazione è la stessa, oltre alla formazione di base, si ritiene che un "tecnico in acustica" debba avere delle conoscenze, seppur minime, sui principali ambiti professionali già citati in precedenza (ambientale, edilizia, architettonica, sicurezza, industriale, etc.). Sulla base di esperienze pregresse si può ritenere che un corso di circa 200 ore, possa permettere una formazione adeguata per un professionista che opera nei vari ambiti professionali con competenze di base.

Si ritiene invece che le competenze specialistiche debbano essere acquisite al di fuori di un percorso formativo per Tecnico in Acustica di tipo generico. La scelta di operare in maniera specialistica in determinati settori, può infatti dipendere da vari aspetti, tra gli altri la formazione scolastica pregressa e le opportunità di lavoro del professionista. Ad esempio, si può dire che un ingegnere civile o edile sarà certamente ben predisposto per operare in maniera specialistica nell'ambito dell'acustica edilizia così come un ingegnere meccanico potrebbe avere un naturale sbocco nell'ambito dell'insonorizzazione industriale e del controllo del rumore e vibrazioni.

In generale si può affermare che il tecnico in acustica generico ha una visione di base per le problematiche di rumore e vibrazioni e le competenze per operare nei vari ambiti in situazioni consuete e ripetitive e capacità per risolvere problemi non

particolarmente critici e complessi. Questa figura professionale potrebbe essere facilmente definita e strutturata in modo da poter operare nei due ambiti legislativi legati alla legge quadro sul rumore (con relativi decreti attuativi) e al decreto legislativo sulla sicurezza e valutazione dei rischi negli ambienti di lavoro.

Dalla figura di tecnico generico sopra descritta, che ha un'adeguata conoscenza del panorama normativo e legislativo in cui opera e la capacità di effettuare misure volte a valutazioni preliminari, si passa all'intervento di uno specialista per i casi complessi o inconsueti.

Per quanto riguarda l'acustica ambientale, il tecnico generico, avendo una formazione di base, sarà in grado di effettuare valutazioni di conformità con i limiti di legge e valutazioni previsionali di clima ed impatto acustico in situazioni semplici. Valutazioni più complesse, come quelle relative all'impatto di grandi infrastrutture, o l'esecuzione di mappature acustiche strategiche e piani di azione di grandi insediamenti urbani, richiedono una formazione specialistica che include anche la padronanza nell'utilizzo di software previsionale.

La formazione di base del tecnico in acustica edilizia deve fornire le competenze per eseguire collaudi acustici ai sensi del DPCM 5-12-97, effettuare calcoli previsionali e stime dei requisiti acustici passivi, dare indicazioni per la scelta dei materiali e per la corretta posa in opera, essere in grado di proporre interventi di risanamento in situazioni semplici. Le competenze specialistiche sono richieste in situazioni complesse, sia per gli aspetti previsionali, utilizzando con cognizione di causa i software commerciali e l'esperienza progettuale, sia per interfacciarsi con gli altri progettisti (impiantisti, architetti, strutturisti) in modo da concordare e consigliare le scelte tecnologiche più opportune, ed anche per il risanamento di situazioni complesse. Anche gli aspetti legati alla classificazione acustica degli edifici, ai sensi delle UNI 11367 e UNI 11444, possono talvolta richiedere competenze specialistiche, sia nella fase metodologica che di calcolo.

Nell'ambito dell'acustica architettonica la formazione di base deve permettere di eseguire misurazioni per la qualificazione acustica degli ambienti, conoscenza dei materiali utilizzati per eseguire trattamenti acustici, calcoli previsionali in situazioni non complesse che possono essere eseguiti con fogli elettronici. La progettazione di teatri e sale da concerto, o in generale di grandi ambienti polivalenti, richiede competenze specialistiche che prevedono, tra l'altro, l'uso di software previsionali complessi, la conoscenza specialistica delle proprietà dei materiali, l'interfacciamento con altri progettisti, musicisti, direttori d'orchestra.

La formazione di base di un acustico che si occupa di insonorizzazione industriale può fornire le competenze per interventi non complessi, trattamenti acustici di ambienti di lavoro, inserimento di schermature, elementi antivibranti o silenziatori. La moltitudine di casi che si possono verificare rende però piuttosto complesso questo ambito professionale. È necessaria una conoscenza specialistica sia delle proprietà dei materiali per l'assorbimento e l'isolamento acustico che quelli utilizzati per la riduzione delle vibrazioni o per lo smorzamento di superfici radianti. La conoscenza di metodi di modellazione numerica può essere di ausilio in molte situazioni. In questo settore è pertanto richiesta una preparazione specialistica.

Per quanto riguarda le valutazioni di sicurezza negli ambienti di lavoro, in termini di esposizione a rumore e vibrazioni, sono adeguate le competenze del tecnico generico. Tuttavia, corsi di formazioni mirati all'aggiornamento sugli aspetti

normativi e alle più attuali misure di prevenzione e protezione, possono far parte di una specializzazione su questo ambito professionale. Inoltre, è recente la pubblicazione della norma UNI/TR 11347 che dovrebbe favorire l'acquisizione delle conoscenze teoriche e le competenze pratiche per elaborare il Programma Aziendale per la Riduzione dell'Esposizione (P.A.R.E.), documento obbligatorio, come descritto dal D.Lgs. 81/2008 e s.m.i.

5 – CONCLUSIONI

La formazione dei professionisti che operano in acustica e vibrazioni risulta variegata ma non strutturata ed omogenea. Gli stessi criteri di riconoscimento della figura del Tecnico Competente in Acustica Ambientale, pur prevista dalla Legge Quadro sul Rumore, risultano disomogenei tra le varie Regioni.

L'ambito relativo alla valutazione del rischio da rumore e vibrazioni negli ambienti di lavoro, pur essendo essenziale per la tutela della salute, sembra quello meno strutturato e tutelato dal punto di vista della formazione e della verifica delle competenze.

In questo contesto, anche sulla spinta dell'obbligo della formazione permanente di varie figure professionali, si stanno moltiplicando corsi molto diversi come durata, efficacia e contenuti.

In considerazione del fatto che nei vari ambiti professionali la disciplina e la strumentazione utilizzata sono le stesse, ci si pone la domanda se la figura di "Tecnico in Acustica", con competenze di base nei vari ambiti professionali, strutturata e prevista nei vari ambiti legislativi, possa rappresentare la soluzione per garantire una gestione equilibrata ed omogenea di questa professionalità nei vari ambiti e su tutto il territorio nazionale. L'omogeneità potrebbe essere rafforzata da un eventuale sistema di certificazione delle competenze effettuato da un ente terzo.

Resta comunque l'esigenza di garantire la formazione di figure professionali con competenze specialistiche, successive alla formazione di base, e per questo ben vengano le varieguate attività delle Scuole ed Enti di Formazione.

Ringraziamenti

Si ringraziano Alessandro Peretti, Andrea Santoni e Andrea Tombolato, per i preziosi suggerimenti.

7 – BIBLIOGRAFIA

- [1] DGR. n. 191 del 25/02/2013: definizione dei requisiti necessari al riconoscimento della figura di Tecnico Competente in Acustica Ambientale
- [2] A. Peretti, "La figura professionale del tecnico competente in acustica", RIA, vol. 36, 1-2012.



Microclima

CEM e ROA



ASPETTI OPERATIVI DELLA MISURAZIONE DEL MICROCLIMA: DOVE, QUANDO E QUANTO MONITORARE. INTERPRETAZIONE E VALORIZZAZIONE DEI SINGOLI PARAMETRI

Gianluca Gambino, Alessandro Merlino, Gabriele Quadrio

CeSNIR, Villasanta (MB)

1 – INTRODUZIONE

Gli accertamenti tecnici relativi al comfort ed allo stress termico si basano su un gruppo di norme di origine ISO (in un caso CEN) che definiscono, caso per caso, gli indici a mezzo del quale quantificare l'entità del disagio/rischio.

Le stesse sono però carenti di indicazioni circa la metodologia di valutazione, soprattutto per quel che concerne le misurazioni.

Scelte come le posizioni di misura, le durate delle misurazioni e i momenti (ora del giorno, giorno dell'anno, ...) sono spesso lasciate al valutatore e questo incide sull'attendibilità dei risultati e sulla ripetibilità delle misure, rendendo difficile operare dei confronti tra misure diverse o valorizzarne i risultati per la ricerca di misure di riduzione del rischio o miglioramento delle condizioni di comfort.

Con questo lavoro si intende far emergere le criticità più rilevanti ed avanzare delle proposte per gestirle, con specifico riferimento alle valutazioni di comfort termico. Innanzitutto è fornita una chiave di lettura di quelle che sono le prescrizioni di legge (in questo caso considerando sia gli aspetti di comfort che di stress termico). Sempre con riferimento alle prescrizioni di legge è esaminato il sistema di limiti previsti per le valutazioni di comfort termico, considerando anche la suddivisione in classi recepite a livello nazionale nel 2006. Si passa quindi ad esaminare gli aspetti metodologici inerenti gli accertamenti tecnici, iniziando dai criteri di scelta delle posizioni dei punti di campionamento, per passare all'organizzazione temporale dei rilievi. È fornito quindi uno spunto per correlare l'esito dei rilievi di microclima indoor con le condizioni meteorologiche outdoor ed è infine fornita una via per l'interpretazione e la valorizzazione degli indici e dei principali parametri fisici.

È anche dedicato uno specifico momento ad una discussione sul metodo di determinazione dell'indice sul disagio da correnti d'aria (DR).

2 – PRESCRIZIONI DI LEGGE

Il primo e fondamentale aspetto da chiarire circa le valutazioni di microclima è quali siano le prescrizioni di legge da rispettare e quali i vincoli imposti dal legislatore.

Si propone di seguito una sintesi operativa degli aspetti legislativi¹.

2.1 – RISCHI E DISAGI

Nel D.Lgs.81/2008 il microclima compare in più titoli: al Titolo II ("Luoghi di lavoro"), al Titolo VII ("Attrezzature munite di videoterminale") e al Titolo VIII ("Agenti fisici").

Nel primo caso il legislatore prescrive che il microclima soddisfi specifici requisiti negli ambienti di lavoro chiusi. I riferimenti pertinenti sono costituiti da:

- art. 63, *Requisiti di salute e di sicurezza* (Titolo II)
- il corrispondente Allegato IV, *Requisiti dei luoghi di lavoro*, al punto 1.9, *Microclima*.

Nel secondo caso sono oggetto di normazione i "posti di lavoro al videoterminale" (uffici per lo più, ma anche sportelli, reception, casse, ...). In questo caso i riferimenti di legge sono rappresentati da:

- art. 174, *Obblighi del datore di lavoro* (Titolo VII);
- il corrispondente Allegato XXXIV, *Videoterminali*, al punto 2, *Ambiente*, lettera e), *parametri microclimatici*.

Nel terzo caso, quando il legislatore inserisce il microclima tra gli agenti fisici di cui al Titolo VIII, intende agire nei confronti dei rischi da stress termico, regolamentando gli ambienti in cui, a causa di severe condizioni microclimatiche, può determinarsi un serio pregiudizio per la salute dei lavoratori. I riferimenti di legge applicabili sono:

- art. 180 - 186 (Titolo VIII "Agenti fisici", Capo I "Disposizioni generali").

Rispetto a questo agente nel dispositivo di legge si segue pertanto un doppio regime che concerne, nel caso dei titoli II e VII l'eliminazione/riduzione dei *disagi* da discomfort termico e nel caso del Titolo VIII l'eliminazione/riduzione dei *rischi* da stress termico. Il fatto che nel primo caso si tratti di disagi e nel secondo di rischi non si traduce in obblighi con diversa priorità per il datore di lavoro; sono infatti prescrizioni di pari forza, ma indirizzate ad ambienti diversi².

È tuttavia vero che se la riduzione dei rischi è un obbligo fondamentale e non derogabile, la riduzione dei disagi è un obbligo subordinato alla sua effettiva attuabilità: perché al datore di lavoro possa essere imposta l'eliminazione/riduzione dei *disagi*, devono infatti esistere le condizioni pratiche perché questo obiettivo sia raggiungibile, ovvero che non esistano vincoli produttivi od ambientali che impediscano di modificare le condizioni termiche dell'ambiente di lavoro ad esclusivo beneficio dei lavoratori e di qui il comune riferimento agli ambienti termici *vincolati /non vincolati*³.

¹ Per una discussione sul tema si può vedere P. Lenzini, D. Freda, P. Capone (2014) *A ciascuno il suo: le diverse vie della valutazione del comfort e dello stress microclimatico*.

² Si osservi che il legislatore, all'allegato XXXIV, concernente i requisiti dei posti di lavoro al videoterminale, al punto 2 (Ambiente), lettera e) (parametri microclimatici) precisa: "Le condizioni microclimatiche non devono essere causa di discomfort per i lavoratori".

³ Ambienti termici non vincolati: classe di ambienti termici dove non esistono vincoli produttivi o ambientali che possano impedire il raggiungimento del comfort termico.

Ambienti termici vincolati: classe di ambienti termici nei quali esistono specifiche esigenze produttive o fattori ambientali che, vincolando uno o più dei parametri microclimatici (temperatura, umidità, calore radiante, abbigliamento) possono impedire che l'obiettivo del comfort termico sia perseguibile.

Gli obiettivi dell'azione di prevenzione sono pertanto distinti in base al tipo di ambiente termico e sono:

- l'eliminazione/riduzione dei rischi per la salute nel caso degli ambienti vincolati;
- l'eliminazione/riduzione dei disagi da discomfort termico nel caso degli ambienti non vincolati (dove i rischi per la salute riconducibili all'ambiente termico si possono dare per assenti).

Dal momento che per gli ambienti non vincolati l'obiettivo di prevenzione riguarda il raggiungimento del comfort termico, l'accertamento è focalizzato sull'ambiente stesso. La valutazione è indirizzata a verificare che siano rispettati i requisiti di cui all'articolo 63 e corrispondente allegato IV e, nel caso di postazioni di lavoro al videoterminale (uffici ad esempio), anche quelli di cui all'articolo 174 e corrispondente allegato XXXIV.

Nessuna verifica di stress è da compiersi perché è ragionevole assumere che tale rischio sia assente in questi ambienti.

Se l'ambiente *non vincolato* non rispetta i requisiti di comfort è necessario intraprendere le opportune misure di riduzione intervenendo sui parametri termoisometrici ambientali. In alcuni casi particolari si può ricorrere all'opzione offerta dal legislatore al punto 1.9.2.5 dell'allegato IV (pertinente per tutti gli ambienti di lavoro chiusi) che recita: *“quando non è conveniente modificare la temperatura di tutto l'ambiente, si deve provvedere alla difesa dei lavoratori contro le temperature troppo alte o troppo basse mediante misure tecniche localizzate o mezzi personali di protezione”*. Tali casi particolari sono rappresentati, ad esempio, da ambienti di grandi volumi gestiti da poco personale (quali i magazzini) per i quali il trattamento termico dell'aria (raffrescamento e/o riscaldamento) può risultare anti-economico nonché anti-ecologico.

Nel caso di ambienti vincolati l'obiettivo di prevenzione è l'eliminazione dei rischi da stress termico (o comunque la loro riduzione al minimo) e l'accertamento è focalizzato sui compiti lavorativi dei quali è verificato se comportino condizioni termicamente stressanti per l'organismo. La valutazione è svolta secondo i criteri generali concernenti tutti gli agenti fisici di cui al D.Lgs.81/08, Titolo VIII, Capo I. Rimangono inoltre valide le prescrizioni di cui all'allegato IV relativamente all'ambiente se si tratta di ambiente indoor.

Se i compiti lavorativi che comprendono fasi in ambienti termici severi risultano stressanti per l'organismo, è necessario intraprendere le opportune misure di prevenzione e protezione che possono prevedere interventi sull'abbigliamento degli addetti, sui tempi di esposizione e sullo sforzo fisico degli stessi.

2.2 – LIMITI DI COMFORT TERMICO

Il D.Lgs.81/2008 non fornisce limiti in senso stretto ai fini della determinazione dei *livelli di disagio termico* negli ambienti termici *non vincolati* o dei *livelli di rischio da stress termico* negli ambienti termici *vincolati*. In mancanza di valori limite definiti dalla legislazione, è prassi fare riferimento a norme tecniche e/o linee guida emesse da enti di riconosciuta competenza; esattamente potranno essere assunti quali riferimenti validi le fonti di cui il D.Lgs.81/2008 fornisce definizione nell'articolo 2, ovvero:

- *norme tecniche,*

- buone prassi,
- linee guida.

A livello internazionale il riferimento assunto per le verifiche dei requisiti termici degli ambienti non vincolati è la norma tecnica UNI EN ISO 7730:2006 “*Ergonomia degli ambienti termici – Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere locale*”.

La valutazione è compiuta mediante il calcolo di sei indici adimensionali, due espressione del comfort termico globale (PMV e PPD) e quattro espressione del discomfort termico locale (DR e tre diversi PD), dove con comfort globale si intende quello percepito dalla persona nella sua interezza e con discomfort locale si intende quello percepito in parti localizzate del corpo.

I disagi termici di tipo locale sono avvertiti perlopiù da lavoratori che si occupano di attività leggere e sedentarie e in cui la sensazione termica globale è molto vicina alla neutralità. Il valore dell'indice che identifica ogni disagio locale rappresenta la percentuale di persone infastidite.

Come detto più sopra le valutazioni di comfort termico sono riferite all'ambiente termico⁴ e i limiti sono forniti per tre possibili categorie di questo: dalla A alla C, dove la A è quella per la quale sono richiesti i requisiti più elevati.

Tabella 1: Limiti per l'esposizione in ambienti non vincolati tramite gli indici di comfort globale (PMV e PPD) e di discomfort locale (DR e PD)

Categoria	Comfort globale		Discomfort locale			
	PPD (%)	PMV	DR (%)	differenza verticale di temperatura	temperatura pavimento	asimmetria radiante
A	< 6	$-0.2 < PMV < +0.2$	< 10	< 3	< 10	< 5
B	< 10	$-0.5 < PMV < +0.5$	< 20	< 5	< 10	< 5
C	< 15	$-0.7 < PMV < +0.7$	< 30	< 10	< 15	< 10

Storicamente, l'intervallo di accettabilità era stato definito in modo univoco richiedendo che il voto medio previsto (PMV) fosse compreso nell'intervallo $-0.5 \div +0.5$. Con la revisione 2006 della norma tecnica UNI EN ISO 7730 gli ambienti termici sono stati invece divisi in tre categorie, ognuna delle quali con propri valori limite per gli indici di comfort globale (PMV e PPD) e gli indici di discomfort locale.

Il limite di riferimento con il quale confrontare i risultati di un accertamento sul comfort termico, deve pertanto essere individuato tra i tre a mezzo di una valutazione preliminare indirizzata alla determinazione della categoria cui appartiene ogni singola postazione di lavoro presa in esame nell'accertamento. La norma non indica tuttavia come compiere questa valutazione per la quale si rimanda al metodo proposto da ISPESL nel 2009⁵ e richiamato brevemente qui sotto.

⁴ Si consideri che una corretta definizione di *ambiente termico* è la seguente: complesso dei parametri che influenzano gli scambi termici tra il soggetto e l'ambiente, dando luogo alle sensazioni termiche. Fanno quindi parte di questi parametri sia le grandezze fisiche ambientali che le grandezze legate all'isolamento termico del soggetto ed alla sua attività fisica.

⁵ del Gaudio M., Freda D., Lenzi P. (2009) *La classificazione degli ambienti termici*.

La categoria è individuata a partire dal valore assunto da un indice detto *fattore di comfort* (F_C) che può assumere valori compresi fra 0 e 10000 e la classificazione nelle tre categorie avviene secondo il seguente schema:

categoria	fattore di comfort
A	$3\,000 < F_C \leq 10\,000$
B	$500 < F_C \leq 3\,000$
C	$0 < F_C \leq 500$

Il *fattore di comfort* è determinato con un algoritmo che tiene conto dei seguenti tre diversi aspetti:

- la *sensibilità termica* dell'individuo, quantificata mediante il descrittore FS;
- l'*accuratezza del compito* lavorativo da eseguire, quantificata mediante il descrittore FA;
- la *praticabilità* di soluzioni di manipolazione termica (condizionamento o riscaldamento) dell'ambiente, quantificata mediante il descrittore FT.

Ciascuna delle tre quantità F_S , F_A ed F_T varia in una scala fra 0 e 10 e il punteggio complessivamente associato ad una data postazione di lavoro è calcolato mediante il prodotto pesato:

$$F_C = (F_S)^{P_S} \times (F_A)^{P_A} \times (F_T)^{P_T}$$

dove i pesi P_S , P_A e P_T assumono i seguenti valori: $P_S = 5/3$; $P_A = 4/3$; $P_T = 1$.

3 – PIANIFICAZIONE DI UN ACCERTAMENTO TECNICO DI COMFORT TERMICO

Alla base di un accertamento tecnico che preveda l'esecuzione di misurazioni ci sono i criteri con i quali sono determinati il numero e le posizioni dei punti di misura, i momenti dell'attività lavorativa durante i quali condurre le misurazioni e la loro durata. Tali criteri, in sostanza, devono dare risposta alle domande: quante misure, dove, quando e per quanto tempo.

Non entreremo invece nel merito di quanto è consolidato circa la risoluzione spaziale e temporale delle grandezze fisiche oggetto di ogni singola misura; per questo le norme tecniche forniscono l'indicazione precisa delle altezze da terra a cui condurre le misurazioni e il tempo da dedicare ad ogni rilievo, tenuto conto del tempo di adattamento delle sonde più lente alle condizioni termiche in ogni nuovo punto di misura.

3.1 – NUMERO E POSIZIONE DEI PUNTI DI MISURA

La valutazione microclima, quando è svolta nel più ampio quadro della valutazione generale dei rischi, riguarda l'edificio e le sue prestazioni e si riferisce ad un utente medio dello stesso.

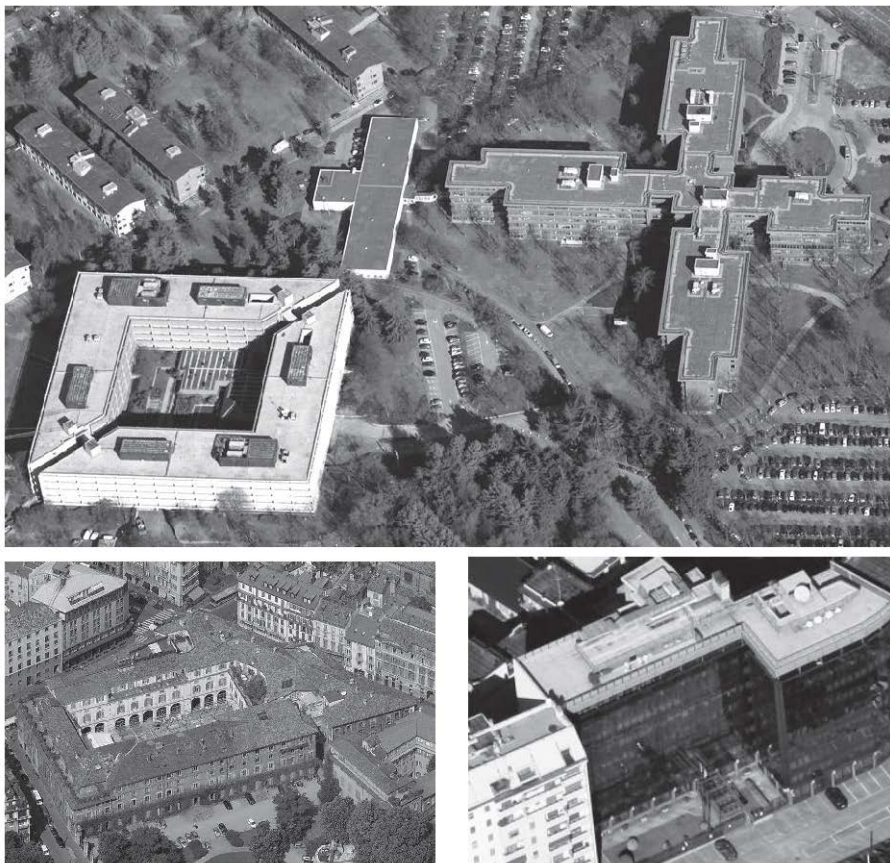


Figura 1: viste aeree di diverse tipologie di edificio: in alto palazzi uffici dei primi anni '70, collocati uno di fianco all'altro, di estensione simile e pianta differente (quadrata l'uno e a croce latina l'altro); in basso a sinistra un palazzo storico di una metropoli italiana, oggi sede di uffici; in basso a destra un palazzo uffici a facciata vetrata. In tutte le foto la direzione sud-nord è dal basso verso l'alto.

Nel pianificare la campagna di rilievi si può essere tentati dall'individuare una griglia di punti con una qualche regolarità su più piani dell'edificio, se non su tutti. Questo approccio conduce generalmente ad un sovradimensionamento dell'azione di monitoraggio che, dovendo essere ponderata con i budget a disposizione, viene normalmente ridimensionata nei tempi di esecuzione con un impatto sull'affidabilità che può essere critico. Si deve infatti tenere conto che il tempo di adattamento di una sonda globotermometrica da 15 cm di diametro è di non meno di 20 minuti e, considerato il peso di questo parametro sugli indici di comfort globale e l'importanza che riveste nell'individuare le situazioni nelle quali il disagio è procurato dalla quota di calore irradiata, non è possibile concedersi sconti in tale senso, cosicché per ogni singolo rilievo sarà necessario investire un tempo di 22 –

23 minuti (20 di attesa e gli altri di misura)⁶. Questo significa che per una campagna di misurazioni, tenuto anche conto dei tempi legati alla logistica della stessa, si devono considerare tempi di esecuzione di circa 2 punti di misura per ogni ora di lavoro. Accelerare questi tempi significa minacciare l'attendibilità dei risultati.

È nostra opinione che si possa recuperare tempo ridimensionando il numero di punti di misura il quale, se si considerano solo aspetti tecnici e si trascurano quelli psicologici, può essere ridotto entro i 20 sostanzialmente per qualsiasi tipo di edificio.

I criteri con i quali determinare il numero minimo delle posizioni di misura si possono individuare nei seguenti:

- verificare gli eventuali effetti penalizzanti dovuti all'irraggiamento solare;
- evidenziare se sussistono importanti disomogeneità nelle condizioni termoisometriche nel palazzo;
- esaminare se il comfort termico risulta influenzato in modo critico dalle differenti condizioni di affollamento degli ambienti;

Nella **Figura 1** sono proposte fotografie aeree di diverse tipologie di edificio, con estensioni superficiali che vanno da alcune migliaia di metri quadrati a diverse decine di migliaia. Si vuole far osservare che le posizioni dei punti di misura che consentono di soddisfare i criteri formulati sopra possono essere determinate con quasi esclusivo riferimento alla forma dell'edificio e al suo orientamento, mentre non risulta significativa l'estensione superficiale. Questo significa che il numero di punti non cresce con le dimensioni della pianta del palazzo, ma con la sua complessità geometrica. Pertanto palazzi con grandi estensioni superficiali si possono esaminare con un numero di punti simile a quelli modesti per dimensioni (per motivi analoghi anche il numero di livelli del palazzo incide in modo limitato sul numero totale di punti di campionamento).

Per dare soddisfazione al primo criterio occorre cercare posizioni di misura in cui la quota di irraggiamento sia rilevante, quindi le postazioni di lavoro più vicine alle parti trasparenti delle pareti sottoposte a soleggiamento. A questo fine risultano interessanti punti intermedi di dette pareti e nel caso di ampie vetrate se non di pareti completamente vetrate, i punti d'angolo, nei quali il soleggiamento incide per la maggior parte della giornata (si pensi all'angolo a sud di una facciata orientata ad est o a ovest). Il numero dei rilievi da condurre a questo scopo può essere però molto limitato.

Ad esempio, lungo una facciata di 100 metri di estensione lineare, come quella dell'edificio a pianta quadrata nella prima foto in alto, possono essere sufficienti due punti di misura. Tuttavia lo stesso numero di punti sarà necessario anche per una facciata analoga per forma ma di dimensioni molto minori. L'indipendenza del numero dei punti dalla dimensione dell'edificio gioca quindi a svantaggio di quelli più piccoli.

Nel caso dell'edificio della foto in basso a destra, a causa della non linearità della facciata e della disposizione dei palazzi vicini, è invece probabile che diventi significativo eseguire almeno tre, se non quattro misurazioni lungo la facciata e

⁶ Considerata questa grande inerzia termica del globotermometro, le misurazioni sono da condurre in condizioni stazionarie o quasi-stazionarie, procedendo, eventualmente, a più misurazioni in momenti diversi per cogliere le variazioni nelle condizioni termiche. Pertanto la singola misura, atteso l'adattamento delle sonde, può durare anche pochissimi minuti.

questo per poter apprezzare le differenze negli ambienti termici che, a parità di utente, si creano a causa delle diverse condizioni di soleggiamento, ad esempio: un punto in posizione intermedia nella porzione est della facciata, che ha esposizione a sud-est; un punto in posizione centrale in corrispondenza dell'angolo, esposto con una vetrata a sud-est e con l'altra a sud-ovest; un punto nella seconda metà della facciata, verso ovest dove, nel pomeriggio, il palazzo ancora più a ovest vi proietta sicuramente l'ombra.

Individuati i punti dove si possono creare le condizioni di maggior svantaggio per effetto dell'irraggiamento solare, riteniamo utile individuarne altri con il ruolo di controllo, ovvero collocati in alcuni (non serve che siano tutti) degli ambienti cui appartengono i primi, ma situati sufficientemente distanti dalle vetrate in modo da risultare riparati dall'azione solare (in prossimità dei corridoi, ad esempio). Il confronto tra il primo e il secondo tipo di rilievo nello stesso ambiente, consente di valutare l'entità della penalizzazione sul microclima riconducibile all'irraggiamento solare.

Anche per verificare eventuali disomogeneità nelle condizioni termiche all'interno dell'edificio non sono richieste mappature capillari. La valutazione di comfort termico non è infatti da confondere con una verifica di buon funzionamento dell'impianto; anzi questo è da dare per scontato e sarà bene che l'ufficio preposto alla manutenzione impianti lo verifichi preliminarmente ad un monitoraggio del microclima. Sono pertanto sufficienti una o due coppie di punti in ambienti analoghi per dimensione e affollamento ma collocati in zone diverse del palazzo. Per questa specifica verifica può essere meglio che i due ambienti si trovino sullo stesso livello fuori terra e dedicare alle variazioni inter-livello un'altra serie di punti allineanti su una verticale (tre ad esempio: piano terra, intermedio e sotto copertura).

Infine, per verificare se sia un fattore penalizzante l'affollamento degli uffici, si procederà ad eseguire delle misurazioni in ambienti con stessa esposizione al sole (meglio ancora se nessuna) e differente densità di occupanti. Questa misura in particolare può essere arricchita di una valutazione sulla concentrazione di anidride carbonica in aria, aspetto che può valere la pena di inquadrare nel contesto più ampio delle verifiche sulla qualità dell'aria indoor.

Con riferimento alle valutazioni di microclima relativa al comfort termico, riteniamo che i rilievi possono essere svolti in modo del tutto efficace con una scelta di pochi punti, mirata a soddisfare i criteri di cui sopra, anziché con un'acritica distribuzione regolare degli stessi nel palazzo. Sulla base della nostra esperienza ogni palazzo può essere esaminato con un numero di punti approssimativamente compreso tra 12 e 20.

3.2 – ORGANIZZAZIONE TEMPORALE DEI RILIEVI

I parametri microclimatici subiscono variazioni nel tempo che possono riguardare sia il breve periodo che il lungo periodo. Nel primo caso ricadono eventuali variazioni veloci che occorrono nell'arco della singola giornata e che definiscono l'eventuale regime non stazionario; nel secondo quelle più lente eventualmente legate a fattori produttivi o a fattori climatici stagionali.

La norma UNI EN ISO 7726:2002 interviene brevemente solo nel merito delle variazioni di breve periodo e, al paragrafo 5.3, specifica che, in condizioni di non stazionarietà, deve essere presa nota delle variazioni delle grandezze fisiche e

parametriche in esame: La stessa norma definisce quindi un criterio per determinare se un ambiente termico si può considerare stazionario o meno, ma non indica con quali modalità valutare gli effetti termici in regime non stazionario, rimandando agli specifici standard relativi al comfort ed allo stress termico.

La norma tecnica UNI EN ISO 7730:2006, dedicata alle valutazioni di comfort termico, considera gli ambienti termici in regime non stazionario al titolo 8. Non fornisce tuttavia indicazioni operative su come valutare gli effetti sul comfort termico dei regimi non stazionari, ma fornisce solo dei criteri per valutare in quali casi la temperatura dell'aria si possa considerare in regime stazionario: se la temperatura varia ciclicamente con una differenza picco-picco non superiore a 1 K, oppure se questa subisce una variazione a gradino con un gradiente non superiore a 2 K/h. Si evidenzia inoltre che variazioni a carattere ciclico con una differenza picco-picco superiore a 1 K possono incidere negativamente sul benessere termico. Sempre la norma 7730 dedica l'appendice H alle valutazioni di lungo periodo. Lo scopo è quello di valutare le condizioni di comfort termico con un orizzonte temporale che si estenda ad un'intera stagione o anno. Sono elencati cinque metodi a questo scopo che non sono però oggetto del presente lavoro. Per completezza si aggiunge che si tratta di valutazioni molto onerose perché richiedono l'uso di sistemi di rilevazione in continuo, distribuiti su più punti di un medesimo edificio.

Il parere degli scriventi è che sia sempre raccomandabile valutare gli indici in due momenti all'interno della medesima giornata di rilievi, eventualmente a scapito del dettaglio spaziale dei campionamenti che, come abbiamo visto sopra, si risolve agevolmente anche con pochi punti di misura. Ottenuti gli indici di comfort globale e discomfort locale in fascia oraria mattutina e pomeridiana, si potrà avere un quadro completo delle condizioni termiche giornaliere, senza cadere nel tranello connesso con eventuali importanti drift di queste nel corso delle ore (a nulla varrà evidentemente il calcolo di un valore medio o altro valore unico).

Ad esempio, nel caso di ambienti temporaneamente soggetti all'irraggiamento solare è frequente riscontrare delle differenze molto significative nelle condizioni termiche e non teneme conto può voler dire esprimere un risultato di completa idoneità o di totale inidoneità dei requisiti di comfort termico a seconda dell'orario in cui sono avvenute le misurazioni.

Si considerino, a titolo di esempio, i seguenti casi, tratti dalla nostra esperienza. In ognuno, tra il primo e il secondo rilievo trascorre un tempo significativo, che noi cerchiamo di mantenere tra 4 e 6 ore. Come si può notare, l'esito della valutazione risulta ribaltato tra mattino e pomeriggio e, tranne nell'ultimo caso, questo è dovuto alla rilevante variazione della grandezza T_r (temperatura media radiante), quantità dipendente dalla quota di calore trasferita per irraggiamento.

Es. 1

Luogo	periodo	esposizione	orario	c'ielo	irraggiamento	T_{out} (°C)
Nord-Est Italia	aprile	sup 1: sud	10:00	coperto	NO	7.0
		sup 2: ovest	17:00	sereno	SI	18.3
orario	PMV	PPD	T_o (°C)	T_a (°C)	T_r (°C)	$T_r - T_a$ (°C)
10:00	0.4	8.4	25.4	25.5	25.2	-0.3
17:00	1.5	49.2	29.5	27.2	31.8	4.6

Es. 2

Luogo	periodo	esposizione	orario	cielo	irraggiamento	T _{out} (°C)
Centro Italia	luglio	ovest	09:30	sereno	NO	25.0
			16:45	sereno	SI	31.5
orario	PMV	PPD	T _o (°C)	T _a (°C)	T _r (°C)	T _r -T _a (°C)
09:30	0.3	7.3	24.8	24.4	25.3	0.9
16:45	1.2	33.0	28.3	26.0	30.7	4.7

Es. 3

Luogo	periodo	esposizione	orario	cielo	irraggiamento	T _{out} (°C)
Centro Italia	luglio	est	11:00	sereno	SI	25.0
			16:00	sereno	NO	31.5
orario	PMV	PPD	T _o (°C)	T _a (°C)	T _r (°C)	T _r -T _a (°C)
11:00	1.0	24.3	28.2	27.2	29.2	2.0
16:00	0.3	7.4	26.1	25.7	26.5	0.8

Es. 4

Luogo	periodo	esposizione	orario	cielo	irraggiamento	T _{out} (°C)
Nord Italia	luglio	sup 1: nord est	10:56	coperto	NO	24.0
		sup 2: sud est sup 3: sud ovest	15:00	parz. coperto	NO	28.5
orario	PMV	PPD	T _o (°C)	T _a (°C)	T _r (°C)	T _r -T _a (°C)
10:56	-0.03	5.0	23.7	23.1	24.4	1.3
15:00	0.81	19.0	26.6	26.0	27.2	1.2

Es. 5

Luogo	periodo	esposizione	orario	cielo	irraggiamento	T _{out} (°C)
Nord Italia	luglio	sup 1: nord est	11:30	coperto	NO	24.0
		sup 2: sud est sup 3: sud ovest	15:31	parz. coperto	SI	28.5
orario	PMV	PPD	T _o (°C)	T _a (°C)	T _r (°C)	T _r -T _a (°C)
11:30	0.46	9.5	26.1	25.9	26.5	0.6
15:31	0.78	17.7	27.6	27.4	27.9	0.5

Nell'ultimo esempio la significativa e critica variazione nel valore dell'indice di comfort globale PMV è invece dovuta un drift della temperatura dell'aria.

In conclusione riteniamo che una campagna di misure per una valutazione di comfort termico in un edificio debba prestare particolare attenzione alle variazioni delle grandezze fisiche nel tempo e, a questo scopo, il numero dei punti di rilevamento può essere ridotto al minimo sulla base dei criteri esposti più sopra, in modo da consentire che il budget a disposizione permetta di condurre un doppio rilievo in ogni punto di misura, uno di mattina e l'altro di pomeriggio.

4 – CORRELAZIONE CON LE CONDIZIONI METEO ESTERNE

In considerazione della dipendenza degli esiti dei monitoraggi indoor dalle condizioni meteorologiche outdoor, sarebbe raccomandabile eseguire i monitoraggi durante giornate ben rappresentative della stagione di riferimento. La norma tecnica UNI EN 15251:2008, al titolo 9.2.2 ("Thermal environment") propone che i monitoraggi invernali siano eseguiti durante le giornate la cui temperatura esterna è pari o inferiore a quella media dei tre mesi più freddi e i monitoraggi estivi quando la stessa è pari o superiore a quella media dei tre mesi più caldi. Questo approccio

risulta però non attuabile nella pratica perché richiede una continua riprogrammazione delle attività, nonché l'esecuzione di molteplici tentativi per giungere al risultato⁷.

Riteniamo di poter far fronte alla necessità di tenere in debita considerazione le condizioni meteorologiche correlando ad esse i risultati dei monitoraggi indoor.

A questo scopo si può innanzitutto condurre la misurazione in esterno della temperatura dell'aria⁸ (°C) e dell'irraggiamento globale⁹ (W/m²). L'utilità della prima è evidente; la seconda restituisce l'informazione sul soleggiamento e anche senza voler valorizzare il dato numerico, questa misura rende possibile riconoscere se nella giornata dei monitoraggi indoor ci sono stati fenomeni che hanno filtrato i raggi solari riducendo sensibilmente il soleggiamento dell'edificio sotto osservazione.

Si consideri ad esempio i grafici in **Figura 2**, risultato di misurazioni di queste grandezze (unitamente all'umidità relativa dell'aria per quanto non di interesse), compiute nel corso di un monitoraggio del microclima indoor.

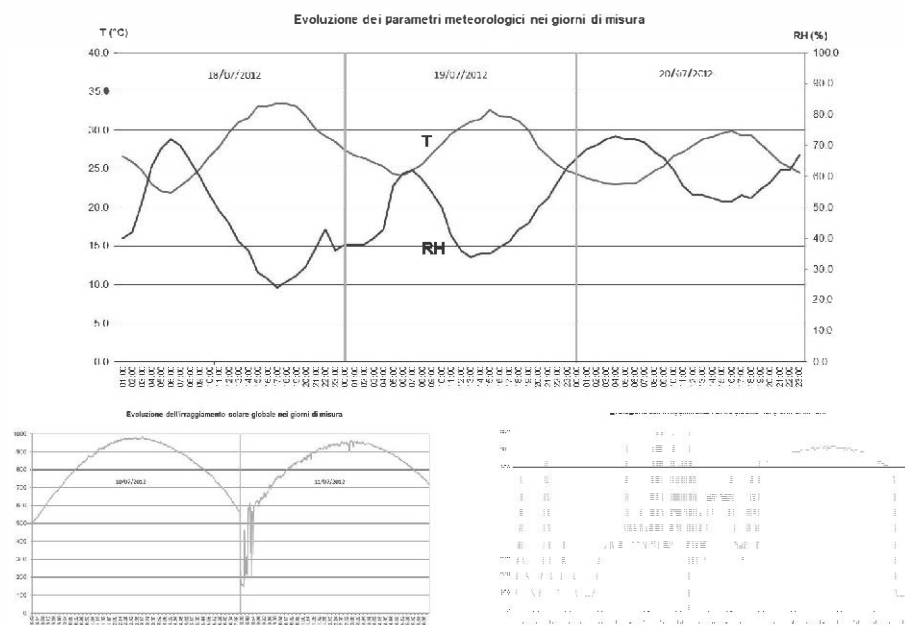


Figura 2: Il grafico in alto mostra l'andamento della temperatura e dell'umidità nell'arco di tre giornate del luglio 2012. I due grafici in basso mostrano invece l'andamento dell'irraggiamento globale, ognuno nell'arco di due giornate sempre del luglio 2012. Le rilevazioni sono state compiute tutte sulla copertura dell'edificio sotto osservazione.

⁷ Aggiungiamo che, per lo meno in Italia, i problemi legati al microclima durante l'inverno sono il più delle volte dovuti all'eccessivo caldo all'interno degli edifici più che al freddo.

⁸ Non riteniamo interessante l'umidità esterna perché non ha alcuna correlazione con il microclima interno, trattandosi di una proprietà fisica che gli impianti di trattamento aria riescono facilmente a modificare.

⁹ L'irraggiamento globale si misura con il piranometro.

Il primo grafico in alto rivela che il primo giorno la temperatura dell'aria esterna compie la maggior escursione, mentre negli altri due minimo e massimo della giornata sono meno distanziati. Soprattutto si nota che nel primo giorno questa supera i 30 °C alle 12:00 e vi rimane sopra sino alla fine della giornata lavorativa (scenderà al di sotto dei 30 °C solo verso le 20:30); inoltre si mantiene tra i 33 °C e i 34 °C per oltre quattro ore. Il secondo giorno la quota dei 30 °C è superata già alle 11:00 ma la temperatura massima è di circa 2 °C inferiore alla giornata precedente. Il terzo giorno la temperatura dell'aria esterna non supera mai i 30 °C.

Sempre nella Figura 2, i grafici in basso mostrano l'irraggiamento globale. Il primo a sinistra è relativo a due giornate pienamente soleggiate, mentre quello a destra rivela nel primo giorno un cielo con copertura variabile e comunque mai del tutto libero e così accade anche nel secondo giorno sino alle 11:00, ora a partire dalla quale si ha il pieno soleggiamento.



Figura 3: evoluzione della temperatura dell'aria nella stagione (diagramma della temperatura minima, media e massima). I pallini sull'asse delle ascisse rappresentano le giornate con almeno una precipitazione. Le bande verticali le giornate più impegnative (secondo un criterio arbitrario) e le bande con la data riportata in alto le giornate in cui si sono svolti i rilievi di microclima.

Oltre all'evoluzione dei parametri meteorologici nel corso delle giornate dei monitoraggi indoor, si ritiene interessante rivedere l'evoluzione del meteo outdoor nel corso di tutta la stagione. Questo consente di valorizzare meglio i risultati perché permette di capire se siano rappresentativi di giornate impegnative o miti della stagione di riferimento, recuperando quindi, anche se per un'altra via, la raccomandazione della 15251 circa la necessità di riferire gli esiti dei rilievi indoor al clima outdoor.

A meno che sull'edificio oggetto di osservazione non sia presente una centralina meteo, a questo scopo si potrà fare riferimento ai dati della centralina ARPA più vicina al luogo delle misure, facilmente reperibili su Internet. L'irraggiamento globale non è normalmente previsto, ma può essere utile acquisire la temperatura dell'aria e le precipitazioni. In Figura 3 sono presenti dei grafici di esempio, riportanti le variazioni della temperatura nel corso di due estati e le giornate in cui si è verificato almeno un episodio di pioggia. Le bande verticali hanno lo scopo di evidenziare le giornate più impegnative della stagione, cosicché sia immediato sapere se le giornate dei campionamenti indoor (bande in colore diverso con riportata la data in alto) si collocano tra queste o meno.

5 – DISAGIO DA CORRENTI D'ARIA

Il disagio da correnti d'aria è uno dei quattro discomfort locali e si valuta attraverso l'indice denominato DR (Draught Rate o Draft Rate)

Il valore di questo parametro dipende dalla temperatura, dalla velocità e dalla turbolenza dell'aria nel punto in cui si valuta il disagio e aumenta all'aumentare della velocità e della turbolenza e al diminuire della temperatura. Aria a temperatura più bassa, a parità di velocità e turbolenza, procura quindi un disagio maggiore; così come aria con elevata turbolenza, ovvero costituita da flussi caotici, a parità di temperatura e velocità, procura un disagio maggiore di un flusso d'aria uniforme.

Il disagio da correnti d'aria (indice DR) è calcolato tramite la

$$DR = (34 - t_{a,l})(v_{a,l} - 0.05)^{0.62} (0.37 \times v_{a,l} \times Tu + 3.14)$$

dove:

$t_{a,l}$ è la temperatura dell'aria, in gradi Celsius, compresa tra 20 °C e 26 °C;

$\bar{v}_{a,l}$ è la velocità media locale dell'aria, in metri al secondo, < 0.5 m/s;

Tu è l'intensità locale di turbolenza, in percentuale, compresa tra il 10% e il 60%.

I limiti per questo indice sono i seguenti:

categoria	DR (%)
A	< 10
B	< 20
C	< 30

Ai fini della valutazione di questo indice è necessario definire un intervallo di integrazione condiviso entro il quale calcolare la velocità media e la turbolenza. Né la norma tecnica 7730, né la 7726 lo riportano ma la letteratura fa la proposta

unanime di considerarlo di ampiezza pari a 180 s^{10} . Le misure concernono pertanto velocità e temperatura dell'aria, da acquisire con una frequenza di almeno 2 Hz, meglio se 5 Hz (cfr. UNI EN ISO 7726:2002, tabella 2). Calcolati i valori di velocità media sul tempo di 180 s e la sua deviazione standard, si calcola l'intensità di turbolenza dal rapporto tra il secondo sul primo e infine il valore dell'indice DR (evidentemente non è invece algebricamente corretto calcolare il valor medio di singoli valori dell'indice).

Un altro aspetto della pratica della misurazione di questo indice che deve essere definito è quanto lungo debba essere il tempo di osservazione.

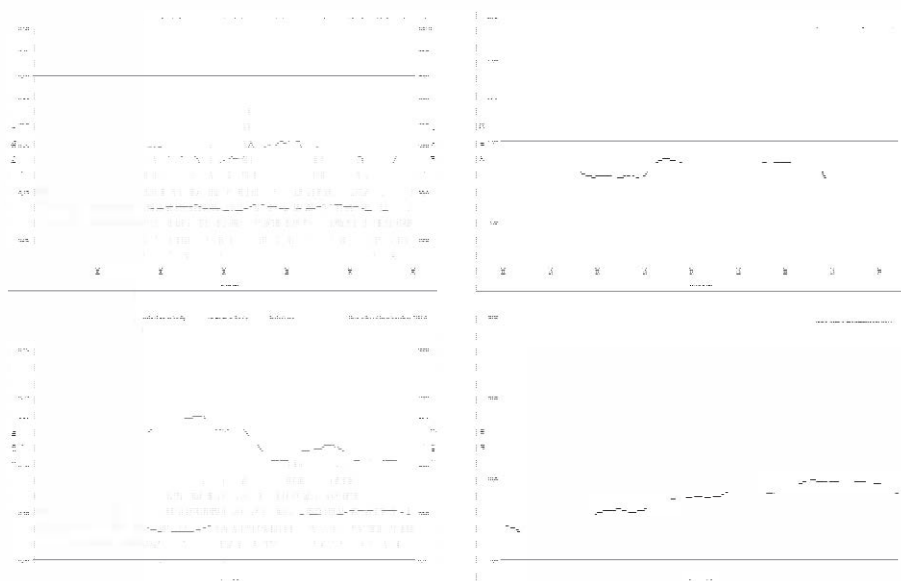


Figura 4: Esempi di valutazioni dell'indice DR, disagio da correnti d'aria.

Nei grafici di sinistra è mostrato il diagramma della velocità istantanea dell'aria, della sua media e della turbolenza, calcolate su una finestra mobile di 180 s e per un tempo di osservazione di 10 min. La linea rettilinea in alto rappresenta il limite di applicabilità della turbolenza (60%).

Nei grafici di destra è invece mostrato il diagramma dell'indice DR calcolato sul medesimo tempo di integrazione e per lo stesso tempo di osservazione. La linea rettilinea in alto ora rappresenta il limite del 20% stabilito per gli ambienti in categoria B.

In **Figura 4** sono riportati gli esiti di due rilievi della durata di 10 minuti ciascuno in cui i calcoli sono svolti su finestre mobili di 180 s, traslate di 1 s l'una rispetto all'altra; a sinistra si trova il grafico della velocità istantanea (10 campioni al secondo), della velocità media e dell'intensità di turbolenza (per la quale è segnata

¹⁰ Si veda ad esempio P. M. Bluyssen (2013) *The Healthy Indoor Environment: How to assess occupants' wellbeing in buildings*

con una retta il limite di applicabilità del 60%). A destra è presentato l'evoluzione dell'indice DR nei 10 minuti di osservazione. L'esempio in alto mostra valori di velocità media, turbolenza e DR quasi costanti, mentre nell'esempio sotto si nota una dinamicità di questi dati che porta l'indice DR a variare dai valori iniziali di 3-5% a valori che, verso la fine del rilievo, toccano il 10%.

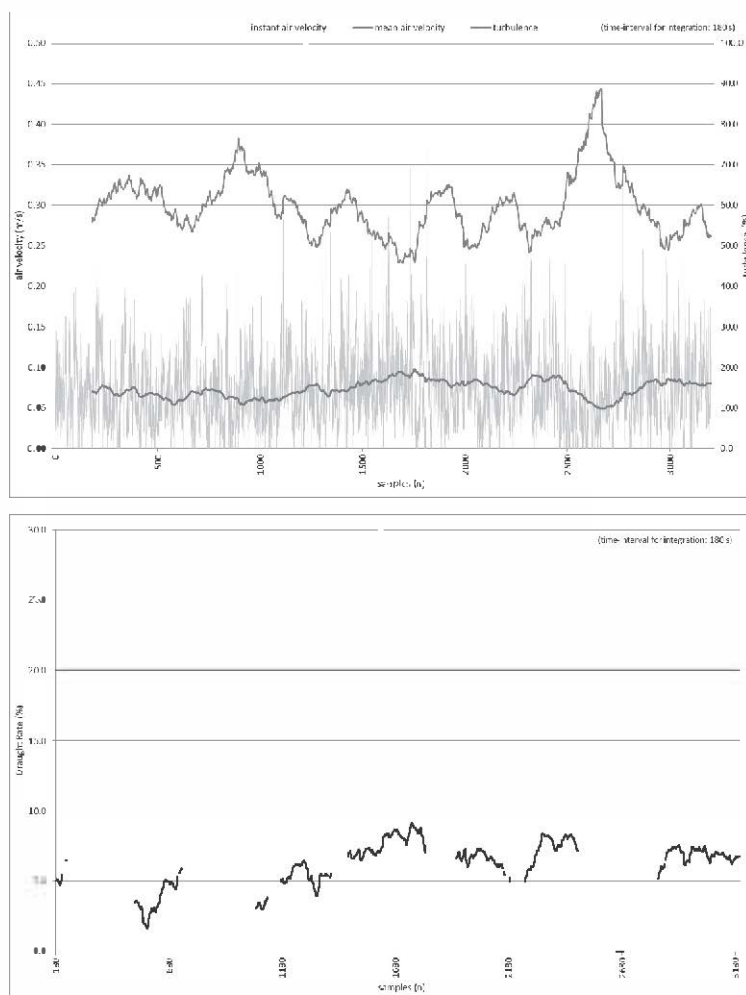


Figura 5: Valutazione dell'indice DR su un tempo di osservazione di quasi 3 h, calcolato su una finestra mobile di 180 s e con un rate di acquisizione di 4 Hz.

Come si nota la dinamica dei valori di questo indice potrebbe essere tale che una misura di alcuni minuti potrebbe non coglierla come si nota meglio dall'esempio in **Figura 5** che rappresenta l'esito di un rilievo della durata di circa 3 ore. La ripetizione di questo rilievo in due momenti della giornata può contribuire ad

abbassare la probabilità di restituire una valutazione parziale del disagio da correnti d'aria, ma va segnalato che ogni valutazione dovrebbe comprendere, a nostro avviso, un tempo di osservazione di almeno 5 – 10 minuti.

6 – ISOLAMENTO TERMICO DELL'ABBIGLIAMENTO

L'isolamento termico del vestiario, insieme al metabolismo, è una delle due grandezze che, fra le sei che occorrono per definire l'ambiente termico, si riferiscono all'individuo e non all'ambiente. Il suo valore è determinato per via documentale, senza compiere misurazioni e a questo scopo si fa riferimento alla norma UNI EN ISO 9920:2009.

Per determinare l'isolamento termico complessivo dell'abbigliamento di un individuo o di un gruppo di soggetti, la norma indica due strade:

1. partire dai singoli capi di abbigliamento (app. B, tabelle B.1 e B.2) e combinarne gli isolamenti per ricavare quello totale;
2. partire da tipiche combinazioni di campi di abbigliamento (app. A, tabelle A.1 – A.10) e correggerle aggiungendo indumenti o eliminandone.

La norma indica due semplici relazioni algebriche, una per ognuno dei due scopi: formula (11), formula (13).

Generalmente è comunemente accettato che per l'estate possa essere assunto il valore standard di 0.5 clo e di inverno quello di 1.0 clo, tenuto anche conto che la stessa norma 7730 ricorda che, nel definire i criteri di progettazione dei diversi tipi di ambienti, sono appunto questi i valori di isolamento termico dell'abbigliamento ipotizzati.

Pertanto, se la valutazione è indirizzata a determinare la prestazione del sistema edificio-impianto nel suo complesso e si riferisce pertanto ad un utente medio, si assumono i due valori di cui sopra a seconda della stagione.

Riteniamo però che questo approccio sia impiegato troppo acriticamente e sia spesso trascurato di considerare i casi in cui l'isolamento termico dell'abbigliamento reale si discosta da questi valori standardizzati. È il caso di quei soggetti il cui abbigliamento è imposto da ragioni aziendali, ovvero tutti coloro che devono indossare una divisa (receptionist, guardie, commessi/e, ...), uno specifico abbigliamento da lavoro (personale sanitario, ...) e anche quegli impiegati ai quali è richiesto un abbigliamento formale (vestito e cravatta per gli uomini, tailleur per le donne, ad esempio). Per costoro l'isolamento termico dell'abbigliamento deve essere determinato in modo specifico.

In sintesi, ai fini della valutazione del comfort termico, saranno generalmente considerati le seguenti tipologie di abbigliamento:

- abbigliamento medio standard nel periodo estivo: 0.50 clo;
- abbigliamento medio standard nel periodo invernale: 1.00 clo;
- abbigliamento specifici: isolamento calcolato.

Per rendere ben fruibili i risultati di una tale valutazione proponiamo di calcolare i valori degli indici globali per un intervallo di possibili valori di isolamento termico del vestiario, restituendo di conseguenza, per il PMV e il PPD, non un unico valore ma un valore minimo e un valore massimo, entro i quali è atteso che siano compresi i valori di detti indici per tutti i soggetti diversamente vestiti che, a parità di

metabolismo, si trovano nel medesimo ambiente. Due esempi di restituzione sono proposti in **Figura 6**.

Indici di comfort globale				
PMV [-0.50 ÷ +0.50]		PPD % [< 10 %]		
0.17 - 0.54		5.6 - 11.1		
Parametri tenno-igrometrici				
T _o (°C)	RH (%)	T _a (°C)	T _r (°C)	T _r -T _a (°C)
20.9	67.9	20.1	22.1	2.0
Indici di discomfort locale				
DR [< 20 %]	PD vert [< 5 %]	PD rad [< 5 %]	PD pav [< 10 %]	V _a (m/s)
29.6	0.1	0.2	8.4	0.12

Indici di comfort globale				
PMV [-0.50 ÷ +0.50]		PPD % [< 10 %]		
0.37 - 0.70		7.9 - 15.3		
Parametri tenno-igrometrici				
T _o (°C)	RH (%)	T _a (°C)	T _r (°C)	T _r -T _a (°C)
21.5	61.2	20.7	22.7	2.0
Indici di discomfort locale				
DR [< 20 %]	PD vert [< 5 %]	PD rad [< 5 %]	PD pav [< 10 %]	V _a (m/s)
0.0	0.2	0.2	7.4	0.01

Figura 6: esempi di restituzione dei risultati di un monitoraggio (stralcio da un rapporto di prova)

Si sottolinea infine l'importanza di procedere alla correzione dinamica dei valori di base dell'isolamento termico (cfr. UNI EN ISO 7730:2006, App. C.2).

7 – ANALISI DEI RISULTATI

In questa sezione riportiamo esempi di considerazioni che si possono compiere sulla globalità dei risultati ottenuti da un monitoraggio del microclima negli ambienti non vincolati, commentando gli indici e i singoli parametri oggetto di misurazione.

Se è stata fatta una valutazione dell'evoluzione meteorologica stagionale, sarà innanzitutto possibile commentare se le giornate di campionamenti si collocano in momenti rappresentativi di condizioni impegnative, medie o miti della stagione di riferimento. Non abbiamo elaborato un criterio analitico, ma riteniamo adeguate le seguenti considerazioni: se i giorni di monitoraggio si collocano nella parte centrale o conclusiva di un periodo piuttosto prolungato di caldo, si possono senz'altro considerare rappresentative delle condizioni più difficili da contrastare da parte del sistema edificio-impianto ai fini del mantenimento del miglior comfort termico indoor; diversamente, un monitoraggio condotto fuori da questi periodi e, ancor di più, prima che si verifichino le ondate di calore più intense, non potrà riferire della prestazione del sistema durante le giornate più impegnative¹¹. Con riferimento al grafico in basso in **Figura 3**, che riprendiamo in **Figura 7**, si può osservare che le due giornate di campionamento si inseriscono in un momento relativamente impegnativo di una stagione (estate 2011) complessivamente piuttosto mite sino alla seconda metà di agosto (vedi parte tratteggiata in **Figura 7**), quando si è verificata una prolungata e intensa ondata di calore. Un monitoraggio in questo ultimo periodo avrebbe potuto restituire informazioni sulla capacità di reazione del sistema edificio-

¹¹ Facciamo riferimento solo alla stagione calda perché la correlazione con il meteo esterno invernale, pur utile, è di contenuto informativo molto più povero, anche in virtù del fatto che i maggiori disagi microclimatici indoor sono connessi con le temperature troppo alte, come già detto.

impianto alle condizioni meteorologiche più impegnative, ma è anche vero che avrebbe avuto valore del tutto parziale trattandosi di un periodo limite nell'arco dell'intera stagione.

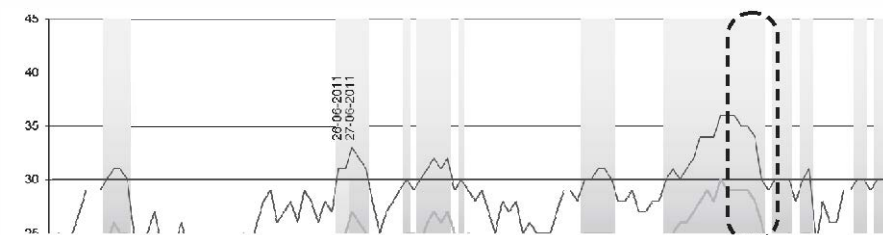


Figura 7

In merito agli indici di comfort globale, PMV e PPD, ed alla temperatura operativa (T_O), si individueranno tutti quei punti in cui si superano i limiti (determinati sulla base della categoria attribuita al singolo ambiente termico) con particolare riferimento ai casi in cui c'è il salto di più di una categoria, ad esempio trovando valori di PMV compresi tra +0.7 e +1.0 in punti in cui risulta applicabile il limite di +0.5.

Inoltre, se si è condotto il doppio monitoraggio si individueranno tutti quei punti in cui le condizioni termoigrometriche cambiano criticamente tra mattina e pomeriggio. Condizione certamente indicativa di un drift critico è il salto di due categorie, mentre il salto di una sola non è detto che lo sia. Con riferimento alla T_O , si può ritenere da segnalare se il differenziale assoluto tra mattina e pomeriggio è superiore a 1 °C.

Per quantificare invece se vi sia una criticità legata all'eccessivo soleggiamento e in generale ad una prevalenza di calore trasferito per irraggiamento rispetto a quello trasferito per convezione, risulta utile determinare in ogni punto di misura la differenza tra temperatura media radiante e temperatura dell'aria ($T_r - T_a$). Sulla base della nostra esperienza è da considerarsi critica se questa differenza supera il valore di 1.2 °C.

In merito all'umidità relativa, si deve considerare che nella stagione calda la si trova normalmente all'interno dell'intervallo ottimale 40% + 60%, ma di inverno non è infrequente riscontrare valori tra il 20% e il 30%. Questi ultimi sono da segnalare perché possono facilmente provocare disidratazione cutanea e delle mucose di occhi, naso e cavità orale, diminuzione delle difese da batteri e germi, senso di secchezza, irritazioni, congiuntiviti, eczemi e aumentare sensibilmente il rischio di raffreddamenti.

In merito agli indici di discomfort locale saranno evidentemente segnalati i superamenti dei limiti.

Infine, per la temperatura operativa T_O e la velocità dell'aria v_a , si potrà compiere un confronto anche con i criteri di progetto (cfr. UNI EN ISO 7730:2006, appendice A). Ad esempio, per uffici in categoria B, la norma indica i seguenti intervalli ottimali per la temperatura operativa:

- estate: 23 - 26 °C;
- inverno: 20 - 24 °C.

Per la velocità dell'aria consiglia invece che non siano superati i seguenti valori massimi (sempre per uffici in categoria B)¹²:

- estate: 0.19 m/s;
- inverno: 0.16m/s.

Si fa osservare che nella ricerca di soluzioni di riduzione è possibile ricalcolare gli indici di riferimento facendo ragionevoli ipotesi sulle correzioni che potrebbero essere apportate a parametri come la temperatura e la velocità dell'aria e la temperatura media radiante.

Se il disagio è dovuto a temperature dell'aria troppo elevate o troppo basse si riscalcoleranno gli indici PMV e PPD assumendo nuovi, ragionevoli, valori per la temperatura dell'aria. Se invece è il contributo radiante a incidere in modo rilevante sul discomfort, sarà più ragionevole rivalutare gli indici di comfort sotto l'ipotesi che siano eliminati i più alti apporti di calore dovuti all'irraggiamento; a questo scopo, in prima approssimazione, si può ricalcolare l'indice PMV postulando la temperatura media radiante pari a quella dell'aria.

8 – BIBLIOGRAFIA

- UNI EN ISO 7726:2002 "Ergonomia degli ambienti termici: Strumenti per la misurazione delle grandezze fisiche".
- F.R. d'Ambrosio Alfano, F. Liotti (2004) "La qualità degli ambienti confinati non industriali: il discomfort termoigrometrico", *G ItalMedLav erg* 2004; 26:4, 401-415 (www.gimle.fsm.it)
- UNI EN ISO 7730:2006 "Ergonomia degli ambienti termici – Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale".
- Coordinamento Tecnico per la sicurezza nei luoghi di lavoro delle Regioni e delle Province Autonome, in collaborazione con ISPESL (2006) "Microclima, aerazione e illuminazione nei luoghi di lavoro. Requisiti e standard. Indicazioni operative e progettuali. Linee guida."
- Decreto Legislativo 9 aprile 2008, n. 81 e successive modificazioni (c.d. Testo Unico sulla Sicurezza) *Attuazione dell'articolo 1 della Legge 3 agosto 2007, n. 123 in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro*, Gazzetta Ufficiale n. 101 del 30 aprile 2008 - Suppl. Ordinario n. 108
- UNI EN 15251:2008 Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica
- UNI EN ISO 9920:2009 Ergonomia dell'ambiente termico - Valutazione dell'isolamento termico e della resistenza evaporativa dell'abbigliamento.
- del Gaudio M., Freda D., Lenzuni P. (2009) La classificazione degli ambienti termici, *Giornale degli igienisti industriali* 34 (2), 186-197, 2009

¹² È bene sottolineare che i limiti proposti dalla norma per la v_a sono intesi per la condizione di progetto, ovvero dove anche gli altri parametri sono compresi negli intervalli ideali.

- del Gaudio M., Freda D., Lenzuni P. (2010) Proposta di classificazione degli ambienti termici moderati, Atti del Convegno **dba 2010** “Rischi fisici: valutazione, prevenzione e bonifica negli ambienti di lavoro. A che punto siamo” (Modena, 6-7 ottobre 2010); 315 – 326.
- P. M. Bluysen (2013) *The Healthy Indoor Environment: How to assess occupants' wellbeing in buildings*, Routledge
- P. Lenzuni, D. Freda, P. Capone (2014) A ciascuno il suo: le diverse vie della valutazione del comfort e dello stress microclimatico, Atti del convegno **dba 2014** “Agenti Fisici nei luoghi di lavoro: aggiornamenti, approfondimenti, esperienze” (Modena, 17 settembre 2014); 269 – 282.

IL MICROCLIMA NEI LOCALI AMPI E CON BASSA DENSITA' DI LAVORATORI, TRA RISPARMIO ENERGETICO E COMFORT TERMICO

Daniela Freda⁽¹⁾, Paolo Lenzuni⁽²⁾, Pasquale Capone⁽¹⁾, Michele del Gaudio⁽³⁾

¹: INAIL – Settore Certificazione Verifica e Ricerca, DiMEILA

²: INAIL – Settore Certificazione Verifica e Ricerca, UOT di Firenze

³: INAIL – Settore Certificazione Verifica e Ricerca, UOT di Avellino

1 – PREMESSA

In un precedente lavoro [1] è stato presentato uno schema che prevede due distinti percorsi di valutazione del microclima, i cui obiettivi sono rispettivamente la verifica della presenza o dell'assenza di condizioni di stress, e la verifica della presenza o dell'assenza di condizioni di comfort. Le radici di questo schema affondano nell'articolazione proposta dal D.Lgs.81/2008 [2], nel quale il microclima viene richiamato sia nel Titolo VIII Capo I "Agenti Fisici – Disposizioni generali", sia nell'Allegato IV "Requisiti dei Luoghi di Lavoro".

I percorsi di valutazione individuati sono mutuamente esclusivi e quindi a monte di tutta la procedura va deciso quale dei due è opportuno seguire. Il criterio mediante il quale prendere questa decisione è così sintetizzabile [1]:

- Tutti quegli ambienti (indoor e outdoor) nei quali sussistono specifiche ed ineludibili esigenze produttive che determinano un vincolo su uno o più dei parametri microclimatici rilevanti (in primo luogo t_a , ma anche UR, v_a , t_r , M e I_{cl}) il quale pregiudica il possibile raggiungimento di condizioni di comfort, vengono detti **vincolati**. Negli ambienti vincolati l'obiettivo è necessariamente la tutela della salute. La valutazione del rischio microclima viene eseguita sulla base di specifiche norme tecniche, la cui applicazione consente di stabilire se si tratta di ambienti **severi**, ovvero ambienti nei quali esiste effettivamente uno stress termico, e nei quali vanno di conseguenza intraprese azioni di limitazione dell'esposizione, o meno.
- Tutti quegli ambienti nei quali NON si individua alcun vincolo in grado di pregiudicare il raggiungimento di condizioni di comfort, vengono detti **moderabili**. Negli ambienti moderabili l'obiettivo è il raggiungimento del comfort. La valutazione del comfort microclimatico viene eseguita sulla base di specifiche norme tecniche, la cui applicazione consente di stabilire se si tratta di ambienti effettivamente **moderati**, ovvero ambienti nei quali si osservano soltanto deviazioni moderate da quelle ottimali, o meno. Poiché in ambienti outdoor le condizioni climatiche non sono controllabili, gli ambienti moderabili sono tutti indoor.

- se siamo in presenza di ambienti vincolati secondo la definizione data sopra, si segue il percorso di destra che ricade sotto la giurisdizione del Titolo VIII e mira a gestire, e se possibile eliminare, eventuali condizioni di stress termico;
- se siamo in presenza di ambienti moderabili si segue il percorso di sinistra che ricade sotto la giurisdizione dell'Allegato IV (punti 1.9.2 e 1.9.3) e mira a verificare la presenza di condizioni di comfort termico.

2 – AMBIENTI DI GRANDI DIMENSIONI: MODERABILI O VINCOLATI?

2.1 – TIPOLOGIE DI AMBIENTI DI GRANDI DIMENSIONI

In generale non è difficile per il valutatore decidere in quale dei due rami della flow chart ricade l'ambiente oggetto dell'indagine. Esistono tuttavia alcuni casi che per le loro particolari caratteristiche possono far sorgere dei dubbi. In questo lavoro ci occupiamo di due specifici casi:

- a) Il primo è quello degli ambienti industriali, caratterizzati da ampi volumi, dove sono realizzate intere filiere produttive. Oltre ad accogliere macchine e apparati di grandi dimensioni, questi ambienti sono talvolta destinati a conservare grandi quantità di materiale a supporto delle attività aziendali svolte in limitati capannoni, nel qual caso il lavoratore svolge il proprio compito con l'aiuto di carrelli a spinta e/o con muletti elettrici, anche cabinati. Questi ambienti sono tipicamente caratterizzati da un numero limitato di aperture e da una limitata necessità di introdurre o fare uscire merci.
- b) Il secondo è quello dei magazzini industriali con prevalente funzione di smistamento. Questi ambienti che qui identifichiamo genericamente come "logistica", sono caratterizzati da un gran numero di aperture verso l'esterno, realizzate allo scopo di rendere più semplici e veloci le operazioni di carico/scarico dei veicoli adibiti a trasporto merci. Le aperture nell'edificio sono realizzate in dimensioni opportunamente grandi in modo da poter ospitare la parte posteriore di qualunque veicolo. La grande varietà di veicoli produce d'altra parte l'effetto di un riempimento spesso parziale di queste aperture, che di conseguenza finiscono per rappresentare corridoi attraverso i quali l'aria esterna penetra facilmente all'interno del locale.

L'assegnazione di queste due tipologie di luoghi di lavoro al mondo degli ambienti moderabili piuttosto che al mondo degli ambienti vincolati si presenta scivolosa ed è importante ragionare sia sul piano formale della regolamentazione sia sul piano sostanziale della praticabilità delle soluzioni di riscaldamento/raffrescamento.

2.2 – REGOLAMENTI LOCALI

In generale, quando si parla di microclima si delinea sempre un panorama normativo molto poco nitido, costituito da leggi e disposizioni vincolanti che fanno uso sistematico di aggettivi come "idoneo" o "adeguato", e da normative tecniche, più stringenti, ma per loro natura non cogenti. Nel caso di ambienti industriali di grandi dimensioni questa carenza di indicazioni è aggravata dall'assenza di prescrizioni

vincolanti anche nella fase costruttiva. Il progettista di ambienti siffatti deve garantire, sostanzialmente, l'agibilità tecnica, e il rispetto della normativa energetica e dei requisiti igienico sanitari; nessuno di questi aspetti è tuttavia finalizzato al benessere del lavoratore. Diversamente da ciò che accade per ambienti ad uso residenziale e assimilabili (scuole, uffici, ospedali ecc), neanche i regolamenti edilizi, il cui rispetto, si ricorda, è vincolante ai fini del rilascio dell'abitabilità/agibilità, contengono specifiche disposizioni per temperatura ed umidità.

Nei pochissimi casi in cui tale indicazione è presente, essa è o lacunosa, o più spesso ambigua, rimandando a quanto disposto dalla normativa energetica e da disposizioni in materia di sicurezza come il vetusto DPR 303/56. Uno dei pochi esempi di indicazione chiara arriva da un documento del comune di Modena [3] il quale:

- prevede temperature minime fra i 4°C e i 18°C per diverse categorie di ambienti, a seconda della specifica destinazione d'uso;
- esclude esplicitamente *“magazzini e depositi sia di pertinenza delle imprese produttive, sia esterni a queste e di servizio generale, compresi quelli destinati al commercio all'ingrosso ed alla movimentazione delle merci, nonché le sedi degli spedizionieri e degli autotrasportatori e le rimesse degli automezzi”* dall'applicabilità del requisito sul controllo della temperatura interna illustrato al precedente punto a). In tal modo questi ambienti vengono implicitamente identificati come termicamente non controllabili, ovvero vincolati.

L'assenza di indicazioni a livello di progetto e l'apparente interpretabilità a livello di valutazione spinge, in taluni casi, anche le aziende sanitarie a dotarsi di propri strumenti a supporto. E' il caso di Trento, dove l'Azienda Provinciale per i Servizi Sanitari (APSS) ha redatto un documento [4] nel quale si stabilisce di far riferimento per tutti i luoghi di lavoro alla norma UNI EN ISO 7730 [5] e, per la climatizzazione invernale degli edifici adibiti ad attività industriale ed artigianale, alla norma tecnica UNI 8852 [6], le cui indicazioni sono qui riportate nella sottostante Tabella 1.

Tabella 1: UNI 8852 – Temperature minime richieste in ambienti industriali

a) attività pesante con continui spostamenti	10°C
b) attività pesante senza continui spostamenti	11°C
c) attività media con continui spostamenti	12°C
d) attività media senza continui spostamenti	13°C
e) attività leggera con continui spostamenti	14°C
f) attività leggera senza continui spostamenti	15°C
g) lavori di precisione (per esempio: orologeria)	17°C
h) riposo, conversazione, lettura, studio	18°C

Lasciando da parte l'aspetto formale che la norma UNI 8852 è stata ritirata nel 2009, la sostanza è che le temperature della Tabella 1 sono molto al di sopra delle temperature alle quali si può iniziare a pensare ad un rischio di ipotermia anche in presenza di un isolamento termico significativo (sicuramente inferiori allo zero [7]). Di fatto il documento [4] afferma che tutti gli ambienti industriali di grandi dimensioni, ovvero sia il tipo a) che il tipo b) descritti nella sezione 2.1, hanno come

obiettivo la realizzazione di condizioni di comfort termico e di conseguenza li identifica implicitamente come ambienti moderabili.

Già sulla base dei due soli casi [3] e [4] sopra illustrati, è possibile notare come diverse realtà locali si siano mosse in direzioni diametralmente opposte. Esiste addirittura un caso in cui, all'interno della stessa area metropolitana, due ASL valutano il microclima in ambienti adibiti ad attività di logistica una identificandoli come moderabili e l'altra identificandoli come vincolati. In sintesi, dai diversi regolamenti locali in materia non emerge alcun consenso relativo ad un singolo metodo da utilizzare per la valutazione del microclima in questi ambienti.

La situazione si semplifica soltanto nei casi di più recente costruzione. Qui il rispetto della normativa energetica UNI/TS 11300-1 [8] impone in ogni caso la presenza di un impianto, e valori di progetto di 18°C in inverno e 26°C in estate, il che induce a classificare con certezza questi ambienti come moderabili.

2.3 – SOLUZIONI TECNICHE DI RISCALDAMENTO / RAFFREDDAMENTO

Considerata l'esiguità e la vaghezza delle indicazioni formali, inevitabilmente l'assegnazione degli ambienti industriali di grandi dimensioni al mondo dei moderabili o dei vincolati deve avvenire sul piano pratico, ovvero sulla base della disponibilità di realistiche soluzioni tecniche che consentano a questi ambienti di mantenere una opportuna (vedremo in seguito come precisare questo concetto) temperatura minima anche in presenza di condizioni esterne che, mutuando la terminologia in uso nel mondo acustico, potremmo definire "a massimo rischio ricorrente" (per l'Italia diciamo qualche grado sotto zero).

Va riconosciuto che riscaldare o raffrescare grandi volumi di aria all'interno di strutture realizzate con materiali non sempre di elevata qualità e, soprattutto, non sempre dotati di accorgimenti tecnici per contenere la dispersione termica, è un compito non semplice e richiede notevoli quantità di energia. Ciò detto, troppo spesso e con troppa disinvoltura gli edifici adibiti ad usi industriali come i capannoni vengono gestiti come "vincolati" invocando motivi tecnici quando invece, il più delle volte il problema è di natura puramente economica. Sebbene nessuno possa negare il peso di considerazioni economiche, esse non possono mai da sole rappresentare il criterio con il quale identificare quale tipo di gestione termica applicare ad un dato ambiente.

Al fine di ridurre i consumi e ottenere un microclima più consono alla esigenza primaria di salute di chi vi lavora, l'elemento critico è ovviamente l'isolamento termico dell'ambiente. In estrema sintesi, l'isolamento termico di un grande ambiente industriale deriva da una combinazione di due elementi:

- le caratteristiche strutturali, ovvero i materiali utilizzati per la costruzione o il rivestimento delle chiusure (pareti e copertura), che incidono notevolmente sulla prestazione termica della struttura. Questo aspetto è indipendente dalla destinazione d'uso del capannone, ed è quindi comune ad entrambe le tipologie di ambienti descritte alla sezione 2.1 (ambienti industriali tradizionali, punto a, e ambienti della logistica, punto b).
- la dispersione di calore nel momento in cui avvengono le operazioni di carico e scarico merci. In virtù della limitata dimensione complessiva e dell'uso parziale nel tempo delle aperture di comunicazione con l'esterno, questo

aspetto risulta secondario negli ambienti industriali tradizionali. Per gli stessi motivi, ribaltati, esso rappresenta invece l'elemento più critico negli ambienti destinati alla logistica (sezione 2.1, punto b).

Riguardo alle caratteristiche strutturali, è chiaro che peggiore è la prestazione termica della struttura (minor isolamento termico), più impegnative saranno le misure tecniche compensative ovvero più potente dovrà essere l'impianto di riscaldamento/raffrescamento finalizzato a mantenere la temperatura adeguata all'attività svolta, con un conseguente più alto dispendio energetico. Questa considerazione ha fatto sì che nel tempo i capannoni venissero costruiti con sempre maggior attenzione a questo aspetto. Nella stragrande maggioranza in essi è oggi presente un impianto di ventilazione, finalizzato almeno al riscaldamento.

Diversamente, per quel che concerne la dispersione di energia attraverso le aperture, soltanto i capannoni di più recente costruzione sono costruiti con portali isotermitici sigillanti tra la bocca di carico e la struttura del camion in grado di mantenere il controllo della temperatura evitando o riducendo gli scambi termici tra temperatura interna e quella esterna. In ogni modo, oggi esistono molti sistemi che consentono di ridurre considerevolmente le dispersioni legate alle aperture e che possono essere installate ex post. Tali sistemi vanno dai più semplici come le porte a scorrimento veloce (Figura 2a) ai più complessi come i portali isotermitici (Figura 2b).



Figura 2a: Porta a scorrimento veloce



Figura 2b: Portale isotermitico

2.4 – INDIVIDUAZIONE DEL CORRETTO PROCESSO DI VALUTAZIONE

Sulla base delle considerazioni svolte nella precedente sezione 2.3, è possibile concludere che le due tipologie di ambienti tratteggiate nella sezione 2.1 vanno trattate in modo distinto:

- Negli ambienti di tipo industriale tradizionale (sezione 2.1 punto a), dove normalmente è presente anche un impianto, la varietà dell'offerta di sistemi di gestione termica ex-post, sia in termini di prestazioni che in termini di prezzo, unita ad una più favorevole condizione strutturale relativa alla minor quantità e dimensione di aperture, implica che, secondo il criterio illustrato nella sezione 1, siamo comunque in presenza di ambienti moderabili e quindi ad obiettivo comfort. In ogni modo, una volta ridotta la dispersione termica con opportuni accorgimenti tecnici, l'istallazione di un impianto di ventilazione o a pannelli

radianti (pannelli sospesi ad elevata temperatura) anche solo localizzati nei punti di maggiore permanenza, diventa per questi capannoni una soluzione non solo possibile ma doverosa. Vanno identificate come moderabili anche quelle aree, all'interno dei magazzini della logistica, in cui operano lavoratori non coinvolti direttamente nell'attività di carico / scarico, nelle quali appare possibile realizzare condizioni termiche controllate. Ciò anche attraverso quelle "misure tecniche localizzate" citate dal punto 1.9.2.5 dell'Allegato IV del D.Lgs. 81/2008 [2] come via d'azione preferenziale *"quando non è conveniente modificare la temperatura di tutto l'ambiente"*.

- Negli ambienti destinati alla "logistica" (sezione 2.1 punto b) al contrario, ad eccezione di quelli di ultimissima generazione, i sistemi più efficaci ex post, in grado di aumentare la capacità di isolamento nelle operazioni di carico e scarico dei mezzi e di ridurre al minimo la superficie di apertura per l'effettuazione dell'attività, possono essere molto complessi e, certamente, un sistema impianto in queste circostanze, tenuto conto del numero delle bocche di carico, delle diverse dimensioni dei camion/furgoni, della frequenza delle operazioni di carico e scarico, diviene energeticamente non solo dispendioso ma molto spesso inefficace. Appare di conseguenza inevitabile l'individuazione degli ambienti destinati alla "logistica" come vincolati.

Alla luce di quanto sopra detto, è auspicabile che l'attenzione al benessere dei lavoratori condizioni a monte il progettista, imponendo una scelta opportuna di materiali ed accorgimenti tecnici per contenere la dispersione termica e la dotazione di un impianto efficace. In questa direzione, anche se con finalità diversa, spinge la direttiva sul risparmio energetico che ispira, ormai già da qualche anno, leggi e normative tecniche per la nuova progettazione. Possiamo quindi augurarci che in un futuro non troppo lontano la condizione di comfort possa essere garantita a tutti i lavoratori che svolgono attività nei capannoni industriali senza per questo produrre un dispendio energetico pesante o insostenibile al datore di lavoro.

3 – IDENTIFICAZIONE DELLE TEMPERATURE LIMITE

3.1 – AMBIENTI MODERABILI

Come mostra la **Figura 1**, gli ambienti moderabili sono ripartiti in tre classi (A, B, C) per ognuna delle quali esiste uno specifico intervallo di comfort termico indicato nella norma tecnica UNI EN ISO 7730 [5]. L'assegnazione di un dato ambiente (in questo caso un luogo di lavoro) ad una di queste tre classi non viene però affrontata dalla UNI EN ISO 7730, e va eseguita per altre vie. Una possibilità è l'utilizzo di un metodo sviluppato dall'ISPESL [9] basato su un algoritmo che tenendo conto della sensibilità dei soggetti esposti, dell'accuratezza del compito eseguito e della praticabilità di modifiche strutturali all'ambiente stesso, determina un punteggio F_C . Negli ambienti industriali dei quali ci stiamo occupando, la combinazione della sensibilità termica individuale, dell'accuratezza richiesta per il compito e della manipolabilità termica dell'ambiente conduce tipicamente ad un punteggio $F_C < 500$ per cui tali ambienti vengono assegnati alla classe C [9]. La **Figura 1** prevede, sulla

falsariga di un'indicazione presente nella norma UNI EN 15251 [10], che gli ambienti assegnati alla classe C (intervallo di accettabilità $-0,7 < PMV < +0,7$) possano accedere ad una deroga per la quale, nei limiti del 10% dell'anno (quindi circa 25 giorni lavorativi), l'intervallo di accettabilità viene esteso a $-1 < PMV < +1$.

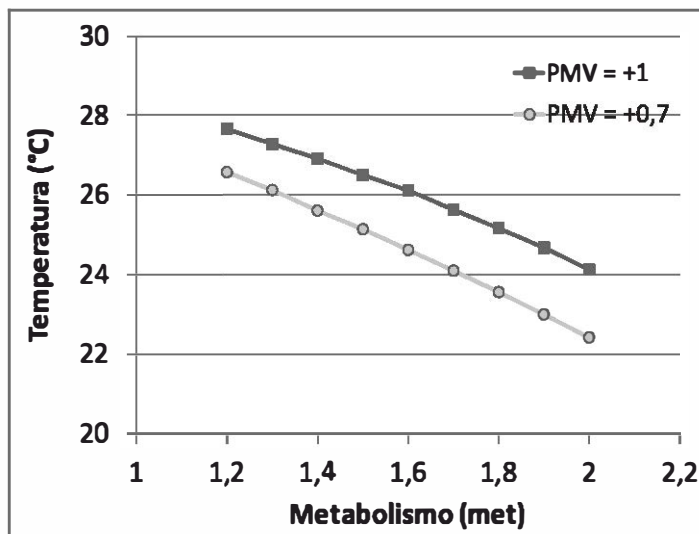


Figura 3: Temperatura massima estiva in funzione dell'attività metabolica

La **Figura 3** mostra le temperature corrispondenti a $PMV = +0,7$ e $PMV = +1$ per diversi valori dell'attività metabolica. Nel calcolo di queste temperature sono state fatte le seguenti assunzioni: $UR = 45\%$; $t_i = t_a$; $v_a = 0,20 \text{ ms}^{-1}$; $I_{cl} = 0,75 \text{ clo}$ [11]. Ricordiamo che quelle rappresentate in giallo (corrispondenti al valore limite $PMV = +0,7$) sono le temperature massime estive generalmente ammissibili, mentre quelle rappresentate in rosso sono le temperature massime relative alla frazione temporale (10%) nella quale il valore limite è aumentato a $PMV = +1$.

La **Figura 4** presenta le stesse informazioni relative alla fase invernale. Le assunzioni fatte sono le medesime, salvo per l'umidità relativa ($UR = 60\%$) e per il vestiario ($I_{cl} = 1,0 \text{ clo}$ [11]). Le temperature minime ammissibili corrispondono in questo caso a $PMV = -0,7$ (curva verde) con deroga a $PMV = -1$ (curva blu) nel 10% del tempo. E' interessante notare come le temperature corrispondenti a $PMV = -0,7$ siano assai prossime a quelle indicate nella obsoleta UNI 8852, come si evince chiaramente dal confronto con la Tabella 1. Quindi, anche se in modo formalmente improprio, chiunque faccia ricorso alla UNI 8852 per individuare temperature minime accettabili invernali di fatto attinge ad una informazione corretta.

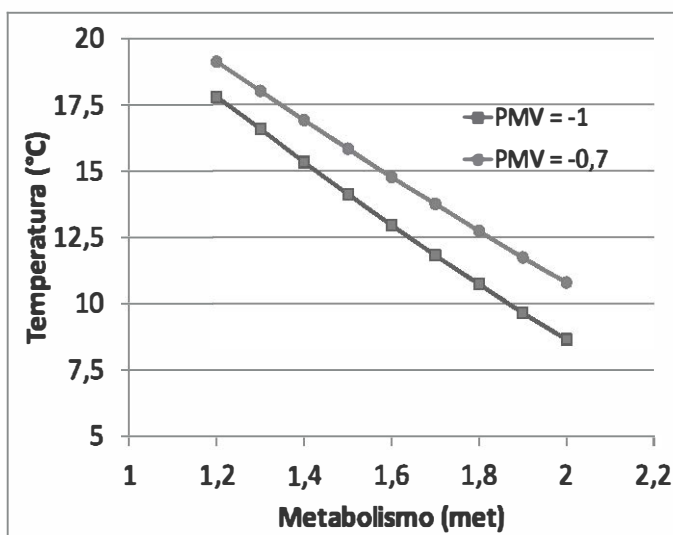


Figura 4: Temperatura minima invernale in funzione dell'attività metabolica

A valle di queste indicazioni, non è mai inutile ribadire un concetto chiave nella gestione della salute e della sicurezza sul lavoro: senza chiedere sempre l'applicazione della tecnologia di ultimissima generazione, se c'è qualcosa di semplice che si può fare per migliorare l'ambiente di lavoro, in questo caso dal punto di vista termico, bisogna farla.

3.2 – AMBIENTI VINCOLATI

Negli ambienti vincolati il lavoratore è tutelato dal rischio microclima mediante le procedure specificate dal Titolo VIII del D.Lgs. 81/2008 [2], che per la parte tecnica si appoggiano alla normativa tecnica, basata sugli indici WBGT e PHS in fase estiva e IREQ in fase invernale. In questo contesto, ma soltanto in questo, sarà possibile far ricorso (in fase invernale) a quei “mezzi personali di protezione” citati nell'Allegato IV del D.Lgs. 81/2008 [2]. Va infatti chiarito inequivocabilmente che il ricorso a sistemi di protezione personali è inapplicabile in ambienti nei quali si perseguono condizioni di comfort e deve essere limitato ad ambienti nei quali va contenuto, e se possibile eliminato, il rischio termico.

I limiti termici applicabili per gestire il rischio negli ambienti vincolati sono molto lontani dalle temperature tipiche di ambienti come quelli indagati in questo lavoro, sia in fase estiva sia in fase invernale. Le previsioni basate sul metodo PHS [12] indicano infatti che anche in giornate caratterizzate da temperature massime molto elevate, intorno a 35°C, non si manifestano rischi di ipertermia. Analogamente le previsioni basate sull'indice IREQ [7] indicano assenza di rischio di ipotermia anche in giornate con temperature massime vicine a 0°C, sempre che, naturalmente venga utilizzato un vestiario sensato. Pertanto, più che sulla verifica del rispetto dei limiti per la tutela dal rischio, che è scontata, è importante porre l'accento sull'importanza di contenere e possibilmente minimizzare l'esposizione ad ambienti molto caldi o

molto freddi. La stessa normativa tecnica per gli ambienti freddi [7] richiede un abbigliamento minimo per evitare rischi ma propone altresì un valore di isolamento (superiore) in grado di garantire condizioni prossime al comfort.

Rischi di ipertermia/ipotermia a parte, lavorare in condizioni termicamente gravose abbassa infatti il livello di concentrazione con la quale si esegue un lavoro, e inevitabilmente aumenta i rischi di infortunio. Di conseguenza è fondamentale in questo contesto il richiamo all'art. 15 del D.Lgs. 81/2008 [2] ed in particolare al suo comma c) nel quale si richiede *“l'eliminazione dei rischi e, ove ciò non sia possibile, la loro riduzione al minimo in relazione alle conoscenze acquisite in base al progresso tecnico”*. Nel merito le leve su cui è possibile agire sono la diminuzione del numero delle bocche di carico contemporaneamente aperte a quelle effettivamente necessario alle operazioni, l'installazione di sistemi isotermici o non isotermici in grado di ridurre l'apertura, le procedure gestionali per evitare comportamenti lesivi o peggioravi (per esempio, nel caso in cui è stato possibile installare un solo dock fisso impermeabile svolgere le operazioni di carico e scarico durante la pioggia solo da quella bocca di carico).

4 – ESEMPI

4.1 – AMBIENTE INDUSTRIALE TRADIZIONALE

Questo primo esempio è relativo alla valutazione del microclima invernale in un magazzino all'interno di un capannone industriale della zona di Roma (**Figura 5**). Sulla base delle conclusioni raggiunte nella sezione 2.3, in assenza di vincoli termici di natura produttiva, si tratta di un ambiente moderabile.



Figura 5: Ambiente industriale tradizionale

Mediante il metodo [9], l'ambiente viene successivamente classificato in classe C. Pertanto la rispondenza ai requisiti consiste nel verificare se nell'ambiente esistono

condizioni tali che $PMV > -0.7$ con una deroga limitata a 25 giorni all'anno nei quali vengono accettate condizioni termiche tali che $PMV > -1$ (Figura 1). I valori misurati dei parametri microclimatici esterni sono: $t_a = 10^\circ\text{C}$, $UR = 40\%$, mentre i valori di quelli interni sono: $t_a = 13^\circ\text{C}$, $t_r = 13^\circ\text{C}$, $UR = 50\%$, $v_a = 0,15\text{ m/s}$. La stima dell'attività metabolica [13] conduce ad un valore $M = 1,4$ met mentre il vestiario è stato valutato a $I_{cl} = 1,26\text{ clo}$ [11]. Il corrispondente valore di PMV è $-0,89$. Il valore di PMV ottenuto è inferiore al valore limite di $-0,7$. Tuttavia esso non è inferiore al valore limite $PMV = -1$, quindi in linea di principio l'ambiente di lavoro potrebbe ancora essere dichiarato confortevole se le condizioni osservate fossero caratteristiche del 10% più freddo dell'anno.

Per avere informazioni a questo riguardo, possiamo rifarci al prospetto VI della norma UNI 10349 [14], dal quale si evince che nella zona geografica in esame, il valore misurato $t_a = 10^\circ\text{C}$ risulta vicino, ed anzi leggermente superiore al valore medio invernale ($t_a = 8,9^\circ\text{C}$) più che a valori estremi. Poiché è presumibile che in corrispondenza di giornate con temperature esterne inferiori a $8-9^\circ\text{C}$ il valore di PMV interno sia inferiore a -1 , e quindi incompatibile con il criterio di accettabilità del comfort, l'ambiente in esame va considerato non confortevole.

Per riportare i valori di PMV all'interno dei limiti di accettabilità e quindi a condizioni di comfort si dovranno adottare le opportune soluzioni tecniche. Supponiamo che l'edificio in questione sia di ultima generazione e quindi provvisto di un impianto termico. In base alla normativa energetica UNI/TS 11300-1 [8] deve essere stata adottata una temperatura minima di progetto invernale di 18°C . Pertanto deve essere possibile per il datore di lavoro portare, accendendo l'impianto, le condizioni termiche all'interno dell'intervallo di comfort. Nel caso specifico ciò richiede temperature minime dell'ordine di $15 - 16^\circ\text{C}$.

4.2 – AMBIENTE DEDICATO ALLA LOGISTICA

Supponiamo di voler valutare il microclima invernale in un ambiente utilizzato per attività di "logistica" nell'area di Pisa (Figura 6). In base a quanto discusso nella sezione 2.3, la necessità di transitare con grande frequenza dall'interno all'esterno è a tutti gli effetti un vincolo ineludibile legato alle esigenze produttive e pertanto l'ambiente è di tipo vincolato. L'obiettivo da perseguire è dunque la tutela della salute del lavoratore come richiesto dal D.Lgs 81/2008 Titolo VIII art. 180 – 181.



Figura 6: Ambienti con attività di logistica

La valutazione di un ambiente vincolato in fase invernale va eseguita mediante l'indice IREQ come indicato dalla norma UNI EN ISO 11079 [7]. Supponiamo di fare la valutazione del microclima in un giorno di dicembre. I valori misurati dei parametri microclimatici esterni sono: $t_a = 0^\circ\text{C}$, $UR = 50\%$, mentre i valori di quelli interni sono: $t_a = 5^\circ\text{C}$, $t_r = 5^\circ\text{C}$, $UR = 40\%$, $v_a = 0,15\text{ m/s}$. La stima dell'attività metabolica conduce ad un valore $M = 1,6\text{ met}$ [13] mentre il vestiario è stato valutato a $I_{cl} = 1,27\text{ clo}$. L'elaborazione dei dati ambientali e metabolici conduce, applicando la norma UNI EN ISO 11079, ad un isolamento richiesto $IREQ_{min} = 1,60$. Poiché l'isolamento del vestiario utilizzato risulta inferiore a quello richiesto ($I_{cl,r} < IREQ_{min}$) esso non è sufficiente a garantire le condizioni minime di accettabilità. Pertanto si tratta di un ambiente da classificare come severo con un potenziale rischio di ipotermia. Tali rischi sono tuttavia molto semplici da eliminare aumentando fino a livello indicato dalla quantità $IREQ_{min}$ l'isolamento del vestiario ed utilizzando mezzi personali di protezione come indicato nell'Allegato IV del D.Lgs. 81/2008 per limitare l'esposizione alle condizioni di stress termico di lavoro e migliorare la performance dei lavoratori.

Va infine ribadito che la gestione degli ambienti freddi mediante vestiario opportunamente isolante si colloca a valle di quegli interventi per *la riduzione al minimo* (dei rischi) *in relazione alle conoscenze acquisite in base al progresso tecnico* citate all'art. 15 comma c) del D.Lgs.81/2008 e già ribadite in precedenza nella sezione 3.2.

5 – CONCLUSIONI

I luoghi di lavoro in cui il processo produttivo impone di mantenere condizioni termiche incompatibili con il comfort lasciano pochi dubbi al valutatore, che deve necessariamente agire limitando il tempo di esposizione e nei casi più svantaggiosi prevedendo l'uso di dispositivi di protezione individuale. Negli ambienti moderabili, viceversa, non sono presenti vincoli termici e l'obiettivo del comfort è realisticamente perseguibile. Le attività svolte in capannoni scarsamente coibentati, in cui sono presenti numerose grandi aperture verso l'esterno rappresentano un caso particolare in cui l'assegnazione all'uno o all'altro dei due mondi non è scontata e la valutazione del microclima è complessa.

In questo lavoro proponiamo un approccio nel quale all'interno di questi ambienti vengono individuati due sotto-ambienti, l'uno identificato come vincolato, a causa delle criticità legate al numero, alle dimensioni e all'utilizzo sistematico delle aperture di collegamento con l'esterno; l'altro identificato come moderabile e quindi ad obiettivo comfort.

Il datore di lavoro non deve però sottovalutare che, nella progettazione dell'opificio, la possibilità di garantire condizioni climatiche moderate in tutto l'ambiente offre notevoli vantaggi non solo in termini di sicurezza dei lavoratori, ma anche di produttività, con potenziali risvolti pertanto anche di natura economica. Le autorità locali hanno il compito di vigilare affinché nei progetti di nuove attività lavorative siano presenti le condizioni necessarie a rendere il luogo di lavoro confortevole.

6 – BIBLIOGRAFIA

- [1] Lenzuni Paolo, Freda Daniela, Capone Pasquale, A ciascuno il suo: le diverse vie della valutazione del comfort e dello stress microclimatico, Atti del Convegno dBA Incontri 2014, Modena, 17 settembre 2014, 269 – 282
- [2] Decreto Legislativo n. 81 del 9 aprile 2008, Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e sicurezza nei luoghi di lavoro, G.U. n. 101 del 30 aprile 2008 – suppl. n.108/L
- [3] Comune di Modena, testo Coordinato della norme di PSC – POC – RUE, Modena, 2009
- [4] Azienda Provinciale per i Servizi Sanitari, Criteri di valutazione di edifici o locali da destinare a luogo di lavoro in ambiente produttivo e nel terziario, Trento, 2012
- [5] UNI EN ISO 7730, Ergonomia degli ambienti termici – Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale, UNI Milano 2006
- [6] UNI 8852 – Impianti di climatizzazione invernale per gli edifici adibiti ad attività industriale ed artigianale – Regole per l'ordinazione, l'offerta ed il collaudo, UNI Milano 1987 (ritirata)
- [7] UNI EN ISO 11079, Determinazione e interpretazione dello stress termico da freddo con l'utilizzo dell'isolamento termico dell'abbigliamento richiesto (IREQ) e degli effetti del raffreddamento locale, UNI Milano 2008
http://www.eat.lth.se/fileadmin/eat/Termisk_miljoe/IREQ2009ver4_2.html
- [8] UNI/TS 11300-1, Prestazioni energetiche degli edifici–Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale, UNI Milano 2014
- [9] del Gaudio Michele, Freda Daniela, Lenzuni Paolo, Proposta di classificazione degli ambienti termici moderati, Atti del Convegno dBA 2010, Modena, 6 – 7 Ottobre 2010, 315 – 326
- [10] UNI EN 15251 – Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica, UNI Milano 2008
- [11] UNI EN ISO 9920, Ergonomia dell'ambiente termico – Valutazione dell'isolamento termico e della resistenza evaporativa dell'abbigliamento, UNI Milano 2009
- [12] UNI EN ISO 7933, Ergonomia dell'ambiente termico – Determinazione analitica ed interpretazione dello stress termico da calore mediante il calcolo della sollecitazione termica prevedibile, UNI Milano 2005
- [13] UNI EN ISO 8996, Ergonomia dell'ambiente termico – Determinazione del metabolismo energetico, UNI Milano 2005
- [14] UNI 10349, Riscaldamento e raffrescamento degli edifici – Dati climatici, UNI Milano 1994

LO STRESS TERMICO DEI LAVORATORI IMPEGNATI NELLE LAVORAZIONI IN SERRA: STUDIO DELLA VARIABILITÀ DEL RISCHIO IN FUNZIONE DELLE CONDIZIONI DI LAVORO

Maurizio Diano, Marco Valentini, Ignazio Di Gesu, Pasquale Samele

**INAIL - Dipartimento di Medicina, Epidemiologia, Igiene del Lavoro e Ambientale,
Centro Ricerche Lamezia Terme (CZ)**

1 - INTRODUZIONE

L'Italia, subito dopo la Spagna, è il paese in Europa dove l'utilizzo dell'orticoltura in serra trova maggiore diffusione. Specialmente in Italia, nell'ultimo decennio, si è avuto un incremento della produzione in serra intorno al 25% con un impegno della superficie in ettari che è passato da 29700 ettari del 2001 a 37100 del 2011.

Per motivi di ordine climatico, di valorizzazione delle disponibilità energetiche naturali, e dei vantaggi competitivi che ne derivano, la maggior parte dell'orticoltura italiana in ambiente protetto si concentra nelle aree meridionali, dove si trova più del 50% dell'intera superficie nazionale del comparto agricolo in questione.

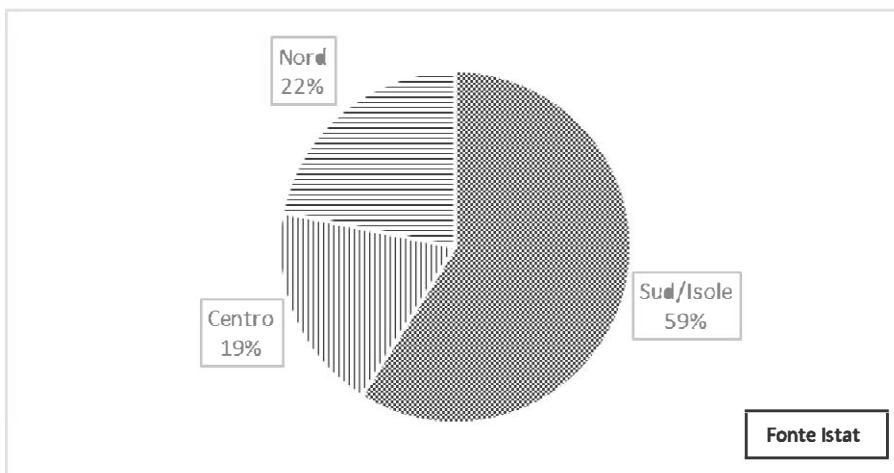


Figura 1: Distribuzione della superficie agricola destinata a produzione in serra nel 2011

La diffusione della coltivazione in serra sta divenendo sempre più evidente man mano che i materiali necessari alla loro costruzione diventano più economicamente

accessibili per i produttori. L'introduzione della plastica come materiale di copertura ha rivoluzionato l'impostazione delle colture anticipate e, quindi, ha permesso l'evoluzione degli apprestamenti in funzione delle condizioni ambientali (temperatura, umidità, ventosità) e delle esigenze delle specie da coltivare.

Le caratteristiche strutturali delle serre variano sia in funzione della cultivar sia per le differenze climatiche che caratterizzano il suolo italiano da nord a sud. Le differenze fanno riferimento prevalentemente all'altezza, alla larghezza, alla lunghezza e alle aperture per il ricambio dell'aria, ma anche alla presenza di sistemi ausiliari di controllo della temperatura. Nelle aree più fredde sovente è la presenza di stufe per proteggere le piante dalle basse temperature notturne, mentre nei climi più temperati il calore del sole, spesso anche d'inverno, occorre smaltirlo mediante aperture laterali con sistemi avvolgenti il film plastico che consentono di regolare la dimensione dello sbocco e quindi l'entità della ventilazione in funzione della temperatura.

E' ovvio che serre con cubature e dimensioni differenti sono diversamente idonee alla coltivazione forzata di alcune specie orticole. Ad esempio per il pomodoro, la melanzana ed i cetrioli occorrono serre di altezza superiore a 3 metri, mentre altezze più contenute risultano più adatte alla specie a portamento basso come fragole, peperone e zucchina.

Nel presente lavoro si è rivolta particolare attenzione, da un punto di vista dell'igiene del lavoro, alla caratterizzazione delle serre naturalmente ventilate, diversificate per cultivar, con struttura in profilato metallico zincato, generalmente con cubatura unitaria da 3 a 5 m³/m² e dimensioni variabili da 800-1000 m² sino a 3000-4000 m². Per la copertura, il film plastico è fissato mediante rulli avvolgitori dotati di manovelle per il controllo delle aperture laterali. A volte a questo sistema di mitigazione della temperatura se ne aggiunge uno supplementare, specie nel caso di serre con estensione maggiore, con apertura parziale del colmo. In aggiunta alla ventilazione, nelle serre più recenti, sottoposte anch'esse ad indagine, la temperatura viene controllata con sistemi di irrigazione a pioggia collocati sul colmo degli spioventi. Infine, per determinate specie orticole, occorre limitare l'esposizione alla luce, per contenere lo stadio vegetativo del fogliame e favorire la produzione frutticola, ricorrendo in tal caso all'imbiancatura delle falde con latte di calce.

2 - INDICI DI STRESS TERMICO

L'interesse verso le serre come ambienti di lavoro si manifesta nella misura in cui gli addetti alle lavorazioni in serra siano soggetti a particolari condizioni di rischio. Le lavorazioni nelle serre orticole espongono i lavoratori alla stessa casistica di potenziali rischi rilevabili nelle lavorazioni agricole in campo aperto con delle singolarità determinate dall'ambiente volutamente alterato. In tale contesto talune situazioni lavorative possono determinare un sensibile incremento del rischio associato a particolari agenti. Nello specifico, appare sensato verificare in che misura le condizioni di microclima (temperatura dell'aria, temperatura radiante, umidità e velocità dell'aria) rilevate in serra in funzione delle particolari condizioni di lavoro (dispendio metabolico, isolamento termico del vestiario, grado di

acclimatazione, ecc.) possano determinare una condizione di rischio per i lavoratori addetti.

Per la valutazione degli ambienti severi caldi presenti in serra ci si è avvalsi di alcuni indici specifici: l'indice WBGT, che consente una stima rapida dell'ambiente termico e l'indice PHS che tiene in considerazione, nell'analisi dell'esposizione, anche delle caratteristiche fisiologiche dell'individuo e del compito lavorativo svolto.

3 - USO DELL'INDICE WBGT

La stima del rischio da stress calorico effettuata mediante l'indice di valutazione WBGT (Wet Bulbe Globe Temperature) fornisce un risultato veloce, seppur caratterizzato da sensibili incertezze, che in via preliminare permette di valutare l'opportunità di ricorrere ad una valutazione più approfondita facendo uso dell'indice PHS.

Il WBGT è un indice empirico di temperatura che viene utilizzato per la valutazione degli ambienti termici severi caldi, derivato dalle correlazioni riscontrate sperimentalmente tra parametri microclimatici e reazioni fisiologiche di un campione numeroso di soggetti.

Per la determinazione delle condizioni di stress termico all'interno di un ambiente è necessario conoscere la temperatura, la velocità e l'umidità dell'aria nonché la temperatura media radiante. L'indice WBGT utilizza alcune grandezze derivate da esse per caratterizzare dal punto di vista termico l'ambiente in esame a seconda che ci si trovi in estemo, in presenza di irraggiamento solare, ovvero in ambienti interni o in estemo in assenza di radiazione solare. Le due relazioni sono:

$$\text{WBGT} = 0,7 t_{nw} + 0,3 t_g \text{ (esterno)}$$

$$\text{WBGT} = 0,7 t_{nw} + 0,2 t_g + 0,1 t_a \text{ (interno)}$$

Nelle precedenti relazioni t_{nw} è la temperatura di bulbo umido a ventilazione naturale, t_a è la temperatura dell'aria e t_g è la temperatura di globotermometro. L'indice WBGT è espresso in gradi centigradi.

I valori limite dell'indice sono tali per cui il nucleo del soggetto esposto non subisca un aumento di temperatura tale da superare i 38°C. I limiti sono riferiti ad una persona in buono stato di salute, adatta all'attività in esame, con una resistenza termica dell'abbigliamento pari a 0.6 clo e permeabilità del vestiario pari a quella degli abiti di cotone. I valori limite del WBGT sono tabellati in funzione della classe metabolica (dispendio energetico del soggetto che sta compiendo la task lavorativa), dell'acclimatazione e della velocità dell'aria.

L'attività metabolica è legata all'attività fisica svolta dal soggetto; più questa è elevata più il valore limite del WBGT sarà basso poiché si determina una maggiore produzione di calore interno.

L'acclimatazione è invece quello stato fisico che l'organismo raggiunge dopo essere stato esposto ad uno sbalzo di temperatura, allorquando la risposta fisiologica si adatta al nuovo stato termico. L'acclimatamento, ossia il processo fisiologico che

porta l'organismo ad adattarsi al nuovo ambiente termico segue alcune fasi ben distinte: la prima è quella di adattamento in cui si ha un allargamento dei capillari periferici e un incremento della sudorazione per consentire il riequilibrio termico. Questa fase sarà più breve nei luoghi secchi piuttosto che in quelli umidi ed entrano in gioco anche fattori esterni, quali il vestiario. In una fase successiva si avranno alterazioni metaboliche di stabilizzazione, comportanti una più bassa produzione di calore da parte dell'organismo. Ovviamente per gli individui non acclimatati i valori limite di WBGT sono abbassati di un numero di gradi proporzionali all'attività metabolica svolta.

Infine la presenza di aria stagnante piuttosto che di movimento d'aria condiziona il quantitativo di calore scambiato dall'organismo per sudorazione e quindi in definitiva il meccanismo di termoregolazione. In presenza di aria stagnante i valori di WBGT sono relativamente più bassi di quelli con aria in movimento, specie per attività metaboliche elevate ove è necessario disperdere nell'ambiente il surplus di calore determinato dall'attività lavorativa.

Tabella 1: Valori limite del WBGT in funzione della classe di tasso metabolico

Classe di tasso metabolico	Tasso metabolico		Valore limite WBGT			
	W/m^2	met	Soggetti acclimatati		Soggetti non acclimatati	
			Aria stagnante	Aria non stagnante	Aria stagnante	Aria non stagnante
0 (a riposo)	≤ 65	≤ 1.1	33	33	32	32
1	65-130	1.1-2.2	30	30	32	32
2	130-200	2.2-3.4	28	28	26	26
3	200-260	3.4-4.5	25	26	22	23
4	>260	>4.5	23	25	18	20

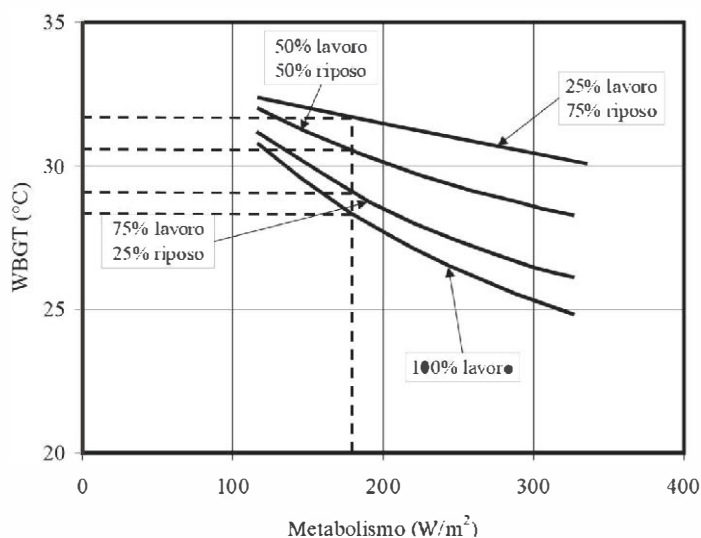


Figura 2: Valori limite del WBGT in funzione de rapporto lavoro/riposo per ogni ora di attività

E' chiaro inoltre che i valori limite di riferimento del WBGT diminuiscono se nell'attività lavorativa sono inserite pause progressivamente più lunghe. Questo fattore incide tanto più quanto l'attività metabolica è gravosa. Qualora l'indice WBGT risulti superiore al valore limite è necessario prevedere delle pause di riposo nei normali cicli di lavoro per evitare che possa verificarsi per i soggetti esposti un accumulo di energia termica all'interno del nucleo.

4. USO DELL'INDICE PHS

Qualora si riscontrino situazioni di rischio nelle quali i valori di temperatura ottenuti sono prossimi o maggiori delle soglie fissate per il WBGT, si può far ricorso ad una valutazione più dettagliata utilizzando l'indice di riferimento PHS (Predicted Heat Strain).

Il metodo quantifica lo stress termico da caldo legandolo alla quantità di calore che il corpo umano può disperdere per sudorazione; il valore di sudorazione risultante dall'applicazione dell'equazione di bilancio termico del corpo umano deve essere tale da non fare insorgere accumulo di energia termica all'interno del nucleo.

La valutazione di accettabilità dell'ambiente termico viene effettuata confrontando alcuni indici sintetici di stress e di strain con i rispettivi valori limite. Gli indici che schematizzano l'ambiente termico e il livello di affaticamento dell'individuo sono:

- La potenza termica dissipabile per sudorazione, SW_{req} ;
- La frazione di pelle dalla quale il sudore può evaporare, w_{req} ;
- Il quantitativo di liquidi perduti per sudorazione, D ;
- La temperatura rettale come valore di stima della temperatura del nucleo corporeo, t_{re} .

I primi due indici, di stress, hanno valori limite variabili a seconda dell'acclimatazione del lavoratore nell'ambiente in cui opera, gli ultimi due indici, di strain, invece, variano in riferimento alla possibilità per il lavoratore di poter reintegrare i liquidi persi per sudorazione. I valori limite dei quattro indici sono riportati in **Tabella 2**.

Tabella 2: Valori limite degli indici di stress e di strain secondo il metodo PHS

Quantità (stress)	Individui non acclimatati	Individui acclimatati
SW_{max} [g/h]	$2,6 \cdot (M-32) \cdot A_{Du}$	$3,25 \cdot (M-32) \cdot A_{Du}$
w_{max}	0,85	1
Quantità (strain)	Accesso libero ai liquidi	Nessun accesso ai liquidi
D_{max95}	5% massa corporea	3% massa corporea
$T_{re,max}$ [°C]	38	

I quattro indici indicati rappresentano altrettante variabili calcolate in funzione delle condizioni di lavoro a cui si riferiscono. Si utilizza pertanto il termine di richiesto (o necessario), utilizzando il pedice "req", per indicare il valore che la variabile deve

assumere per soddisfare l'equazione di bilancio con accumulo nullo. Mentre il limite (o massimo), utilizzando il pedice "max", è utilizzato per indicare il valore massimo attribuibile alla variabile in base a considerazioni fisiologiche.

Se si verifica che $w_{req} < w_{max}$ e $SW_{req} < SW_{max}$, il soggetto raggiungerà l'equilibrio termico e i valori reali delle grandezze risultano pari ai valori richiesti.

Nell'ipotesi che la sudorazione reale sia inferiore a quella richiesta per mantenere l'omotermia, si crea un accumulo di energia all'interno del nucleo; per evitare che questo possa comportare danni alla salute del soggetto esposto, conducendo l'individuo verso il colpo di calore ($t_{re,req} > t_{re,max}$), è necessario limitare la durata dell'esposizione all'ambiente caldo.

La durata dell'esposizione deve essere anche limitata al fine di evitare che dal corpo evapori una eccessiva quantità di sudore ($D_{req} > D_{max}$); questo può infatti comportare, per i soggetti esposti, l'insorgere di deficit idrominerali.

Il calcolo del tempo limite di esposizione, DLE, viene allora condotto prendendo in considerazione i due criteri.

5. LA CAMPAGNA DI MISURANELE SERRE

Tra le aree meridionali ove le colture in serra trovano ampia diffusione è da annoverarsi certamente, in Calabria, la piana del lametino, prospiciente il litorale tirrenico. In quest'area la produzione orticola, soprattutto di zucchine, melanzane, pomodori, cetrioli e fragole, è andata sviluppandosi nel tempo seguendo il trend di espansione che ha caratterizzato la produzione agricola nel recente passato.

Come accennato in premessa nel presente lavoro si è rivolta particolare attenzione alla caratterizzazione microclimatica delle serre naturalmente ventilate, diversificate per le cultivar menzionate, con struttura in profilato metallico zincato, di diversa cubatura e dimensioni. La campagna di misure è attualmente in corso, ma i dati raccolti sino a questo punto permettono già di avere un quadro della situazione in essere su cui è possibile tracciare, a grandi linee, uno schema generale della condizione di rischio da stress termico dei lavoratori addetti.

Le misure hanno abbracciato diversi periodi dell'anno tralasciando quelli invernali nei quali si è ritenuto aprioristicamente di non riscontrare le condizioni microclimatiche tali per cui si possa paventare una condizione di rischio da ambienti severi caldi. Le misure sono state condotte durante le operazioni di lavoro, quindi con la serra occupata dai lavoratori; in particolare, l'attenzione è stata rivolta alle operazioni che coinvolgono la manodopera in operazioni manuali (ad esempio raccolta) e con impegno collettivo (presenza contemporanea di più soggetti).

Le misure sono state effettuate mediante un multi-acquisitore capace di registrare nel tempo l'andamento dei parametri fisici utili alla determinazione degli indici sintetici di rischio e per tempi congrui a caratterizzare il clima termico durante le lavorazioni o, in alcuni casi, per l'intera durata di permanenza dei lavoratori in serra. La posizione di misura è stata scelta in modo tale da essere rappresentativa dell'esposizione all'ambiente serricolo evitando, per quanto possibile, di rilevare i valori dei parametri in posizione prossima al confine perimetrale dell'installazione per evitare l'influenza delle condizioni ambientali esterne, trattandosi per lo più di serre a ventilazione naturale.



Figura 3: Apparato strumentale utilizzato per le misure in serra.

I parametri registrati sono stati: temperatura aria, temperatura aria umida a ventilazione forzata, temperatura aria umida a ventilazione naturale, temperatura del globotermometro, velocità aria. Le sonde di misura sono state posizionate a circa 0,8 m dal terreno per simulare la posizione del nucleo corporeo corrispondente ad una persona china sulla schiena per l'operazione di raccolta di piante a basso portamento (zucchine, peperoni, fragole) ovvero a 1,1 m per quelle a portamento medio (melanzane, pomodori, cetrioli).

Per la stima dell'impegno metabolico durante le operazioni di raccolta, per conformità metrologica ci si è riferiti a stime effettuate in lavori analoghi ipotizzando pertanto un carico metabolico pari a 170 W/m^2 nel caso della raccolta in genere tranne che per la raccolta di fragole durante la quale si stima un impegno pari a 150 W/m^2 . La differenza è da imputarsi alla differente modalità usata dagli addetti nella raccolta delle diverse specie orticole. Normalmente, infatti, l'operatore raccoglie il prodotto riponendolo in un canestro che viene trasportato a braccio dallo stesso lungo il filare; solo in una seconda fase tutto il raccolto viene sistemato nelle cassette. Nel caso delle fragole, essendo i frutti molto delicati, l'operazione di raccolta viene eseguita mediante il riempimento diretto di vaschette ciascuna delle quali viene sistemata in cassette per il trasporto.

Per quanto riguarda l'abbigliamento esso risulta variabile da medio-pesante nei periodi più freddi con pantaloni e maniche lunghe, per diventare molto leggero nei mesi più caldi. Normalmente chi esegue il lavoro di raccolta è di sesso femminile, solo in rari casi gli uomini sono impegnati in questa mansione.

6 - I RISULTATI DELL'INDAGINE

Sono state eseguite 45 misure tra marzo e novembre con un campione di dati più consistente nei mesi estivi (giugno, luglio e agosto) ed escludendo i mesi invernali per i quali l'indagine si è ritenuta poco significativa.

I valori calcolati del $WBGT_{ext}$ sono sintetizzati in **Figura 4** in cui sono visibili, per ciascun periodo, i valori medi, minimi e massimi. Confrontando i dati con il valore

limite desumibile dalla **Tabella 1** per un carico metabolico pari a 170 W/m^2 e nell'ipotesi che il personale addetto sia acclimatato, in quanto già esperto nella particolare pratica lavorativa, se ne deduce che, in termini di valore medio, effettivamente nei mesi estivi di luglio ed agosto si ha un superamento del TLV, condizione che si estende anche al mese di giugno nel caso in cui sia impiegato personale con modalità di lavoro tali da non essere acclimatato. Se invece dei valori medi dei WBGT misurati ci si riferisce ai valori massimi dei campioni rilevati, la situazione di compromissione si estende anche ai mesi di maggio e settembre in quanto anche in questi mesi si è registrato in almeno un caso una situazione di superamento del limite suggerito.

La situazione riscontrata, che evidenzia in modo chiaro un rischio da stress termico per i lavoratori impegnati nei lavori in serra nei mesi estivi, potrebbe essere in qualche misura controllata e ridimensionata nella sua classe di pericolosità agendo con opportune pause di lavoro in modo da consentire all'organismo di smaltire il surplus energetico accumulato nelle fasi di attività.

Riferendosi ai dati in **Figura 2**, dove le linee tratteggiate si riferiscono alla realtà in studio, risulta evidente che potendo disporre di pause dal lavoro, ad esempio nella misura del 25% del tempo di attività, il limite di temperatura definito con il WBGT diverrebbe circa 29°C e addirittura con pause del 50% salirebbe a circa $30,5^\circ\text{C}$. In quest'ultima condizione più del 50% delle situazioni fuori norma presenti nei mesi di luglio ed agosto rientrerebbero nei limiti consentiti. Ovviamente bisogna valutare la reale applicabilità di una disposizione di tal genere.

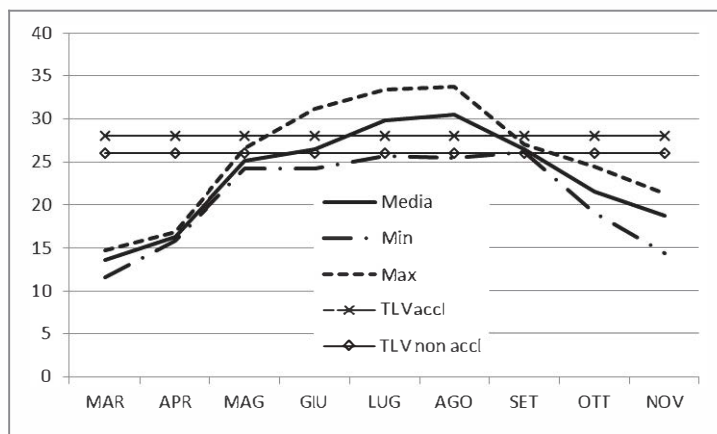


Figura 4: Andamento annuale dei valori medi, minimi e massimi dell'indice WBGT_{ext} misurato in $^\circ\text{C}$

La valutazione fatta utilizzando l'indice WBGT permette, come s'è visto, di giungere ad un risultato incontrovertibile circa le situazioni di rischio presenti durante i mesi più caldi. Nel prosieguo si cercherà di analizzare in modo più approfondito, utilizzando la metodologia di valutazione che si basa sul valore del Predicted Heat Strain (PHS), alcune delle situazioni che il calcolo del WBGT classifica al di sotto del limite. Il metodo PHS consente di effettuare una valutazione mirata e dettagliata in quanto accetta come parametri in ingresso dati che permettono

di specificare le condizioni di lavoro e le caratteristiche del soggetto che lo compie. Allo scopo sono stati scelti tre soggetti, donne, di peso ed altezza tali da coprire diverse fasce del BMI (Body Mass Index). Di tali soggetti è stata calcolata l'area di superficie corporea BSA (Body Surface Area), in quanto parametro antropometrico essenziale nel modello PHS, facendo uso della relazione empirica di DuBois:

$$A_{DU} [m^2] = (W^{0.425} \times H^{0.725}) \times 0.202$$

con W, peso, espresso in Kg e H, altezza, in m.

Si considerano i soggetti acclimatati, in quanto esperti nella loro mansione, con carico metabolico del lavoro svolto pari a 170 W/m² ovvero 150 W/m² per le fragole, ed un vestiario da lavoro estivo ma adatto all'attività da svolgere. A tal proposito va detto che nella raccolta delle melanzane, ma anche delle zucchine e dei cetrioli, gli addetti usano coprirsi maggiormente, specie gambe, mani e braccia in quanto essendo piante tomentose, soprattutto sulle foglie, provocano lievi irritazioni da contatto. Alla tenuta standard estiva formata da reggiseno, mutande, maglietta o blusa leggera, pantaloni lunghi in cotone, calze e scarpe da lavoro, cui corrispondono 50 clo, che caratterizza il normale vestiario degli addetti alla raccolta di fragole e pomodori, si aggiunge una maggiore copertura delle braccia, con maniche lunghe e guanti, nelle fasi di raccolta delle melanzane, zucchine e cetrioli, che porta l'isolamento complessivo a 60 clo.

Tabella 3: Dati caratteristici del campione rappresentativo di lavoratori sottoposti ad indagine

Lavoratore	Grandezze personali		B.M.I.	A _{DU} [m ²]	Acclimatazione	Posizione lavoro	ICL [clo]	Met [W/m ²]	Fase di lavoro
	Massa [Kg]	Altezza [m]							
A [donna]	57	1,65	Normo-peso	1,62	Si	In piedi	0,5	150	Raccolta fragole
B [donna]	71	1,68	leggero sovrappeso	1,81	Si	In piedi	0,6	170	Raccolta melanzane

Essendo il PHS una valutazione determinata sui parametri specifici del soggetto, dell'attività svolta e del microclima, non è possibile effettuare analisi generalizzate come per il WBGT ma occorre determinare gli indici caratteristici del metodo valutativo caso per caso.

Giacché si ipotizza di ritenere attendibili le situazioni di rischio individuate con il WBGT ci si chiede se ed in quali condizioni i lavoratori per i quali si è calcolato un indice al di sotto del valore limite possano invece superare i TLV definiti dallo standard PHS. Allo scopo ci si riferisce alle misure che hanno dato luogo ai minimi valori registrati di WBGT_{ext} nei mesi di maggio e luglio, rispettivamente pari a 24,2 °C, e 25,7 °C, quindi ampiamente al di sotto del limite raccomandato pari a 28 °C. Le specifiche dei parametri ambientali misurati per tali misure sono riportate in **Tabella 4**.

Ai fini della tutela della salute degli addetti alle condizioni di microclima severo caldo è richiesto che la durata della giornata lavorativa sia limitata ad un tempo massimo dato da:

$$D_{lim} = \min (D_{lim, T_{re-max}} ; D_{lim, D_{max95}})$$

Essendo $D_{lim, T_{re-max}}$ il tempo dopo il quale la temperatura rettale T_{re} raggiunge il valore limite $T_{re,max}$ e $D_{lim, D_{max95}}$ il tempo dopo il quale la quantità di acqua complessivamente perduta supera il valore D_{max95} .

Tabella 4: Parametri ambientali relativi ai valori minimi di WBGT nel periodo di riferimento

Periodo di riferimento	Ta °C	Tw °C	Tnw °C	Tg °C	Tr °C	RH %	Va m/s	WBGText °C
Maggio	24,3	17,3	19,3	41,3	51,9	48,4	0,02	24,2
Luglio	26,0	21,6	22,7	36,3	43,2	67,0	0,1	25,7

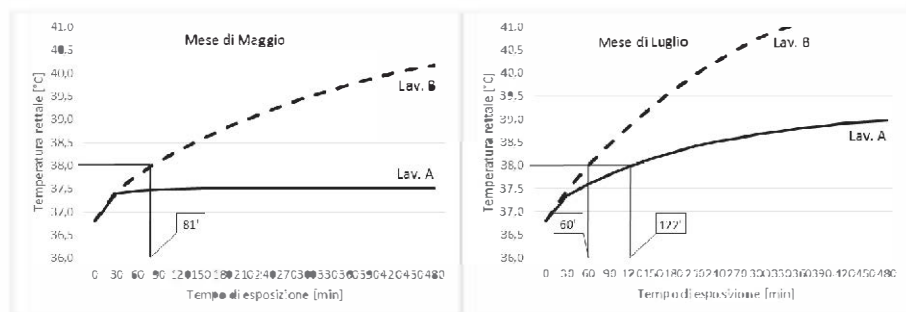


Figure 5a e 5b: Andamento della temperatura rettale T_{re} in funzione del tempo di permanenza in serra. Indicati i tempi massimi di permanenza corrispondenti alla massima temperatura rettale consentita.

Tabella 5: Tempi massimi di permanenza corrispondenti al massimo quantitativo di liquidi che possono essere perduti dai campione di lavoratori considerato

Periodo	Stima del tempo $D_{lim, T_{re-max}}$	
	Lavoratore A	Lavoratore B
maggio	146'	159'
luglio	140'	152'

Nelle Figure 5a e 5b e in Tabella 5 sono visibili, per i due periodi considerati, l'andamento della temperatura rettale per i lavoratori (A e B) esposti ai parametri ambientali riportati in Tabella 4 ed il tempo dopo il quale il quantitativo di liquidi perduti dal corpo raggiunge il valore limite pari al 3% della massa corporea. Come è facile desumere, nei casi considerati, sebbene la valutazione effettuata mediante l'applicazione del metodo WBGT pareva attribuire una condizione di rischio da tenere sotto controllo ma senza destare particolari timori, applicando, invece, il più dettagliato metodo PHS, si giunge alla conclusione che la permanenza dei lavoratori

negli ambienti serricoli, alle condizioni ambientali e di lavoro riscontrate, deve comunque essere limitata nel tempo. Va tuttavia considerato che, almeno nelle situazioni sottoposte ad indagine, il tempo realmente impiegato dagli addetti per le operazioni di raccolta in ciascuna serra è compatibile con i tempi massimi di permanenza calcolati.

7 - DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

L'indagine condotta ha permesso di giungere ad una prima caratterizzazione di ambienti di lavoro, le serre orticole, che, almeno in taluni periodi dell'anno, quali quelli estivi, possono considerarsi severi caldi. Data la diffusione di tali apprestamenti sul territorio ed il loro uso intensivo, si è ritenuto utile approfondire la condizione di rischio a cui sono esposti i lavoratori occupati nel settore, tanto più che spesso le operazioni lavorative sono caratterizzate dall'avere un notevole carico metabolico.

L'indagine condotta ha consentito di verificare che effettivamente in alcuni periodi dell'anno le serre orticole sono ambienti in cui è reale il rischio da esposizione ad ambienti severi. L'indice WBGT ha permesso di individuare i mesi di luglio ed agosto come quelli in cui senz'altro si hanno problemi legati a tale tipo di esposizione.

I casi analizzati permettono di concludere che l'affidabilità della stima del rischio utilizzando l'indice WBGT è circoscritta ai casi in cui si ha il superamento del relativo valore limite mentre nei casi in cui l'indice non supera tale valore, ma si approssima ad esso, è bene approfondire l'analisi con metodi più puntuali come ad es. il metodo PHS. Infatti mentre l'indice WBGT consente una stima rapida ma relativamente accurata della condizione di stress termico, l'indice PHS, più laborioso, risulta anche molto più preciso in quanto basa il metodo valutativo oltre che sui parametri ambientali misurati anche su specifiche sia fisiologiche che eziologiche che meglio consentono di caratterizzare la reale situazione espositiva del lavoratore. In più, il metodo PHS permette di seguire nel tempo la risposta fisiologica del corpo umano.

L'applicazione del metodo valutativo del "Predicted Heat Strain" ha individuato alcune situazioni rischiose che l'altro metodo aveva sottovalutato. Si è così potuto verificare che, specie quando il lavoro condotto è gravato da sensibili carichi metabolici, la permanenza prolungata in serra genera condizioni di stress. Il maggiore o minore carico metabolico così come l'entità dell'isolamento termico del vestiario dipendono dalle particolari colture e quando entrambi gli elementi si sommano danno luogo a condizioni di rischio ancora più rilevanti. In tale condizione una possibile soluzione è quella di intervallare l'attività lavorativa con opportune pause. La Figura 2 permette immediatamente di verificare che introducendo una pausa lavorativa pari al 25% del tempo di lavorazione, per ogni ora di lavoro, il valore limite dell'indice WBGT aumenta di circa un grado. Tuttavia la debolezza di questa modalità organizzativa sta nel fatto che, come si è potuto constatare durante la campagna di misure condotta, nelle lavorazioni agricole essa non risulta di fatto applicabile in quanto improponibile per motivazioni di carattere economico, legate alla contingenza dei tempi di lavoro, e quindi facilmente eludibile.

Per poter ridurre il rischio è necessario pertanto intervenire con sistemi alternativi. In tal caso la metodologia valutativa del PHS ci viene in aiuto fornendo i tempi massimi di permanenza in serra, il che suggerisce di effettuare le operazioni di raccolta intervenendo con un numero di lavoratori tale per cui sia garantito l'esito della necessaria operazione lavorativa entro i termini temporali di sicurezza calcolati.

Un'altra valida alternativa è quella di effettuare le lavorazioni in serra nei periodi meno caldi della giornata, normalmente di mattina fino alla 10 circa, sfruttando l'allungamento del periodo diurno dei mesi estivi.

8 - RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Monarca D, Valutazione e controllo del rischio microclimatico nelle imprese agroalimentari. In Atti del Convegno **dba 2010**
- [2] Marucci A, Pagnello B, Monarca D, Colantoni A, Biondi P, Cecchini M, The heat stress for workers during vegetable grafting in greenhouses. International Conference Safety Health and Welfare in Agriculture, Ragusa, 2012, pp. 321-328
- [3] Cecchini M, Colantoni A, Massantini R, Monarca D, Estimation of the risks of thermal stress due to the microclimate for manual fruit and vegetable harvesters in central Italy. *J Agric Saf Health*, 2012, 16(3):pp. 141-159.
- [4] Callejon-Ferre A, Manzano-Agugliaro F, Diaz-Perez M, Carreno-Sanchez J, Improving the climate safety of workers in Almeria-type greenhouses in Spain by predicting the periods when they are most likely to suffer thermal stress. *Applied Ergonomics*, 2011, 42:pp. 391-396.
- [5] ISTAT, 2012. Sistema informativo su agricoltura e zootecnia, dati annuali sulle coltivazioni.
http://dati.istat.it/Index.aspx?DataSetCode=DCSP_COLTIVAZ&Lang=
- [6] Montesano F, L'orticoltura in ambiente protetto, in Quaderno di Orticoltura, edito da Centro di Ricerca e Sperimentazione in Agricoltura "Basile Caramia" di Locorotondo(Ba), 2009, pp.21-33.
- [7] UNI EN 27243:1996. Ambienti caldi. Valutazione dello stress termico per l'uomo negli ambienti di lavoro, basata sull'indice WBGT (temperatura a bulbo umido e del globotermometro).
- [8] UNI EN 7933:2005. Ergonomia dell'ambiente termico - Determinazione analitica ed interpretazione dello stress termico da calore mediante il calcolo della sollecitazione termica prevedibile

**GLI ALUNNI MISURANO LA SCUOLA.
CONDIZIONI TERMO-IGROMETRICHE E DI QUALITÀ DELL'ARIA
NELLE SCUOLE PRIMARIE DELLA PROVINCIA DI AVELLINO**

**Grazia Memmolo¹, Carmine Piccolo², Ida Campitelli², Rossella Luciano²,
Francesca Marotta¹, Michele del Gaudio²**

¹: INAIL Direzione Territoriale di Avellino

²: INAIL Settore Certificazione Verifica e Ricerca UOT di Avellino

1 – PREMESSA

L'Italia, nel periodo compreso tra il 2005 ed il 2009, avvalendosi dello studio di esperti del Ministero Ambiente, ISPRA, Fondazione Maugeri, Federasma Onlus e ARPA ha partecipato al progetto Europeo SEARCH (School Environment and Respiratory Health of Children) il cui rapporto conclusivo evidenzia la necessità di tutelare la salute di insegnanti ed alunni con azioni di miglioramento delle condizioni degli ambienti di lavoro.

La Legge n. 23 dell'11 gennaio 1996, "*Norme per l'edilizia scolastica*", che ha sostituito il D.M. 18/12/1975 contenente "*Norme tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica, ivi compresi gli indici di funzionalità didattica, edilizia ed urbanistica, da osservarsi nella esecuzione di opere di edilizia scolastica*" indica, tra le altre cose, il numero di ricambi/ora di aria primaria, da fornire nelle aule (ric/ora = rapporto tra il volume di aria di rinnovo introdotto e il volume del locale in un ora). Il riferimento normativo evidenziato è di fatto applicabile soltanto in strutture in cui sia installato un impianto di ventilazione meccanica ma, il patrimonio edilizio scolastico italiano, è costituito prevalentemente da strutture vetuste in cui la climatizzazione delle aule è realizzata solo con impianti centralizzati a termosifoni e quindi senza il controllo della ventilazione. In assenza di un ricambio continuo dell'aria, la presenza di numerosi alunni in un volume d'aria relativamente piccolo, favorisce l'accumulo dell'anidride carbonica prodotta con la respirazione, ed in pochi minuti si raggiungono valori di concentrazione superiori al limite di 1000 ppm che le linee guida INAIL [1] segnalano come indicative di condizioni non confortevoli. All'interno delle aule, l'unica possibilità per rendere le condizioni microclimatiche adeguate alle ore studio/lavoro effettuate, resta quindi quella di aprire/chiudere i termosifoni o di aprire le finestre per favorire il ricambio dell'aria.

Tenuto conto di queste evidenti peculiarità è risultato essenziale formare gli insegnanti e gli alunni sulla necessità di aver cura in maniera autonoma delle condizioni termo igrometriche e di qualità dell'aria del proprio ambiente di studio e lavoro, in quanto queste incidono sul livello di attenzione e in taluni casi sulla possibilità che si verifichino incidenti ed infortuni.

2 – BASI DI PARTENZA ED OBIETTIVI

Studi svolti da INAIL [2] hanno confermato che gli ambienti scolastici presentano una serie di peculiarità e rischi per i lavoratori da non sottovalutare.

I livelli di rumore presenti nelle aule e le caratteristiche acustiche delle stesse, costringono il docente a sforzare quotidianamente la voce, provocando una malattia professionale conosciuta come disfonia.

Altre esperienze, hanno evidenziato come le condizioni “termo-igrometriche” e soprattutto, un inadeguato ricambio dell’aria, possono abbassare il livello di attenzione limitando il rendimento scolastico degli alunni e predisponendo gli stessi e i loro insegnanti a potenziali infortuni [3].

Con questo progetto INAIL si pone l’obiettivo di coinvolgere direttamente alunni e insegnanti nell’attività di monitoraggio dei parametri microclimatici ai quali sono esposti, per informare e contemporaneamente educare alla tutela della salute e sicurezza nei luoghi di vita e lavoro attraverso il metodo del “learn by playing”.

Con questa metodologia sono stati trasmessi agli studenti tutti gli elementi necessari a comprendere quando sussistano o meno le situazioni di confort nel loro luogo di lavoro e ad intervenire in modo autonomo per migliorare la qualità dell’ambiente.

Il progetto ha inoltre permesso di monitorare un gran numero di aule scolastiche e di poter caratterizzare ciascuna di esse calcolando il valore di incremento della concentrazione nell’unità di tempo ed il valore dell’intervallo t-open oltre il quale è necessario aprire le finestre.

3 - IL PROGETTO

Il progetto “misuriamo la scuola” svolto negli anni scolastici 2013-2014 e 2014-2015, è stato sviluppato con lezioni frontali tenute da esperti INAIL nelle aule scolastiche delle classi IV e V della scuola primaria della Provincia di Avellino, ed ha coinvolto quasi 1000 alunni di numerosi istituti scolastici.

La metodologia didattica utilizzata è stata quella dell’ “osservazione partecipata”, ovvero consentire agli alunni di utilizzare personalmente gli strumenti di misura in dotazione al settore ricerca dell’INAIL per misurare e monitorare i parametri microclimatici e di qualità dell’aria nell’aula. Gli esperti formatori, richiamando i concetti di fisica previsti dal programma di studio, hanno svolto, in ciascuna classe partecipante al progetto, una lezione della durata di due ore, articolandola nelle seguenti fasi:

Analisi delle cause del riscaldamento/raffreddamento dell’aula.

Si è richiamata l’attenzione sulle cause che contribuiscono al raggiungimento della temperatura dell’aula: esposizione dell’aula al sole, funzionamento dell’impianto di riscaldamento e raffreddamento, impianto di illuminazione, numero di persone presenti in aula, funzionamento di apparecchi elettrici (lim – pc – video proiettore).

Richiami ai concetti di temperatura, umidità relativa e di velocità dell'aria, descrizione degli strumenti di misura e del loro principio di funzionamento.

Utilizzando la strumentazione di misura in dotazione agli esperti INAIL e con il supporto di slides sono stati illustrati i principali strumenti di misurazione della temperatura, umidità relativa e velocità dell'aria. In particolare è stato descritto il funzionamento del tradizionale termometro a mercurio, del termometro digitale, e di una centralina microclimatica. E' stato, inoltre, illustrato il funzionamento del monitor per la misura della concentrazione di CO₂.

Richiami allo studio della respirazione umana.

Attraverso l'uso di immagini in movimento è stato approfondito il funzionamento dell'apparato respiratorio umano e dei processi ossidativi che portano alla produzione di anidride carbonica presente nell'aria.

Misura delle dimensioni dell'aula e calcolo del volume.

Evidenziando che al pari del numero di alunni presenti, la quantità di aria presente nell'aula è determinante per il raggiungimento, più o meno rapido, di una situazione di discomfort e selezionando le migliori strategie di misura sono state rilevate le dimensioni dell'aula ed è stato calcolato il volume totale.

Registrazione e analisi dei dati.

A ogni alunno è stata fornita una scheda per poter appuntare i valori di temperatura, temperatura di globo, umidità dell'aria, velocità dell'aria e concentrazione di anidride carbonica, misurati più volte durante le due ore di lezione. Con i dati ottenuti i bambini, guidati dagli esperti INAIL, hanno poi disegnato un diagramma cartesiano – che riportando sull'asse delle ascisse gli orari delle rilevazioni effettuate, e sull'asse delle ordinate i livelli di concentrazione di anidride carbonica, ha consentito di disegnare la curva di variazione della concentrazione di anidride carbonica durante le due ore di lezione.

Valutazione dei dati ottenuti e comparazione con i livelli ottimali da mantenere a scuola ed in ambiente domestico

Gli alunni, grazie alla realizzazione del diagramma, hanno avuto modo di focalizzare l'attenzione sui dati misurati dagli strumenti e di confrontarli con le percezioni personali, individuando le azioni necessarie per eliminare le sensazioni sgradevoli. La loro attenzione è stata, altresì, richiamata sul fatto che l'accrescimento della quantità di anidride carbonica nell'aria sia determinato sia dal volume dell'aula e sia dal numero di persone presenti. Mostrando i grafici di misurazioni della concentrazione effettuate in ambiente domestico è stata richiamata l'attenzione sulla necessità di garantire condizioni di confort anche a casa. Durante la lezione, l'utilizzo del pc e del videoproiettore nonché dell'attività di misurazione delle dimensioni dell'aula, è stato possibile valutare i rischi presenti nell'aula legati all'impianto elettrico, alla caduta dall'alto, alla movimentazione dei carichi e all'esposizione a sostanze pericolose. Per ciascun rischio sono state illustrate le "buone prassi" che è possibile adottare per evitare incidenti.

4 – I RIFERIMENTI NORMATIVI PER IL COMFORT NELLE SCUOLE

Il Decreto Ministeriale 18 dicembre 1975, a cui fa ancora riferimento per i limiti di riferimento la Legge 11 gennaio 1996 n. 23, indica la necessità di garantire nei locali scolastici un temperatura dell'aria compresa nell'intervallo $18 \div 22$ °C. Lo stesso Decreto fissa per scuola primaria una superficie minima per ogni alunno di 1,8 m² ed un apporto di aria esterna pari 2,3 ric/h. Per ottenere un limite di riferimento che tenga conto dell'impegno metabolico associato all'attività svolta dagli alunni è necessario calcolare gli indici di Fanger indicati nello standard UNI EN ISO 7730[4]. Nelle aule scolastiche esiste un fattore di sensibilità legato all'età degli alunni (> 14) che impone di scegliere come limite la classe B della UNI EN ISO 7730 corrispondente all'intervallo di PMV ($-0,5 \div +0,5$) corrispondente ad un numero di insoddisfatti (PPD) del 10 % [5]. Le aule scolastiche sono caratterizzate da avere normalmente una scarsa variabilità dei parametri microclimatici con valori prossimi alle condizioni di comfort. L'attività metabolica degli alunni e dell'insegnante non è particolarmente gravosa ed è quantificabile in 1,4 Met, l'isolamento del vestiario utilizzato è mediamente pari a 1,00 Clo, e pertanto assunto che il valore di umidità relativa sia prossimo al 50% ed il valore di velocità dell'aria sia inferiore a 0,10 m/sec., possiamo prevedere per quali valori di temperatura l'indice PMV resta nell'intervallo ottimale. Nella **Figura 1** sono riportati i risultati della simulazione che mostra come i valori di PMV sono compresi nell'intervallo $+0,5 \div -0,5$ se la temperatura ambientale è compresa nell'intervallo $18,5 \div 23,5$ °C.

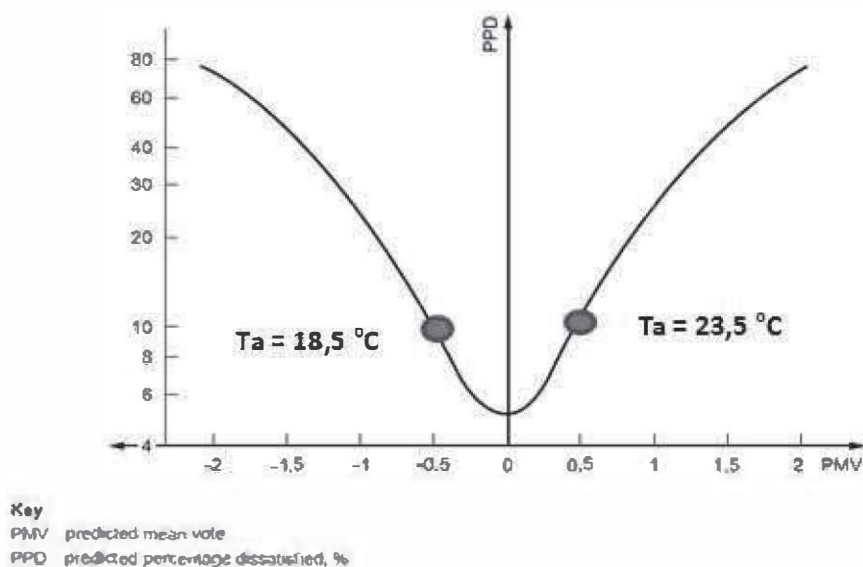


Figura 1: UNI EN ISO 7730 Temperature dell'aria confortevoli in una aula scolastica

5- IL CALCOLO DI "t-open"

Durante le lezioni, in ciascuna aula, sono stati registrati i valori microclimatici e di concentrazione della CO_2 utilizzando una centralina microclimatica Deltha Ohm modello HD 32.3 completa di sonda anemometrica ad elemento caldo, sonda globo termometrica con diametro di 5 cm e sonda capacitiva per la misura di temperatura ed umidità dell'aria ed un monitor di gas CO_2 modello ToxiRae Pro CO_2 . Per conoscere i valori presenti all'esterno, le prime misure sono state realizzate fuori dalla finestra. Successivamente i sensori sono stati posizionati sulla cattedra per acquisire i valori interni.

A partire dai dati misurati per ciascuna classe è stato calcolato il valore di incremento/minuto della concentrazione di CO_2 , da cui è stato possibile calcolare il tempo massimo entro cui è necessario riaprire le finestre denominato "t-open" indicativo del tempo in cui il valore di concentrazione, partendo dal valore misurato all'esterno, supera il valore di 1000 ppm. A titolo d'esempio si riportano di seguito i dati misurati in una delle aule esaminate. Nella Tabella 1 sono riportati i valori microclimatici registrati all'esterno ed in due misure interne, mentre nel grafico di Figura 2 è riportato l'andamento della concentrazione della CO_2 in una delle aule esaminate. Il valore di concentrazione dell'anidride carbonica misurato all'esterno era pari a 500 ppm, l'aula esaminata aveva un volume di circa 121,00 m^3 ed erano presenti 24 soggetti, fra docenti ed alunni.

Tabella 1: Condizioni microclimatiche

	t_a	t_g	RH	V_a
Esterno	26,90	30,10	35,20	0,65
Interno 1	24,00	24,30	52,00	0,07
Interno 2	24,50	24,42	51,40	0,24

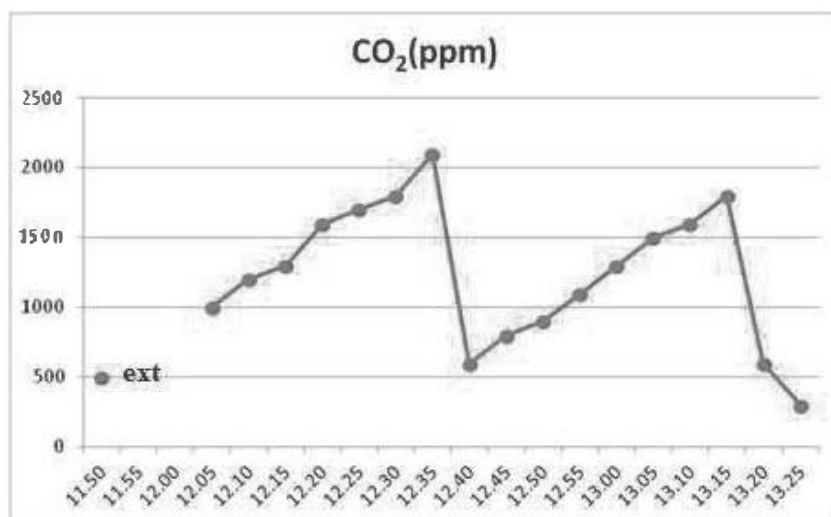


Figura 2: Andamento della concentrazione di CO_2

Per questa aula è stato calcolato un incremento della concentrazione di 34,28 ppm/min ed il relativo t-open calcolato è risultato pari a circa 20 min.

6 - DISCUSSIONE

Fino ad aprile 2015 sono state valutate circa 50 aule scolastiche, ubicate in edifici di diversa età ma tutte in buone condizioni di manutenzione e dotate di infissi con buona tenuta all'aria. Le aule avevano però dimensioni molte diverse fra loro con volumi compresi fra i 90 e 200 m³ ed una presenza di alunni variabile fra un minimo di 10 ed un massimo di 25.

Il valore di t-open calcolato, quindi, è stato estremamente variabile e compreso fra un minimo di 8 minuti ed un massimo di 35 minuti. I valori più bassi sono stati calcolati in poche situazioni dove era peraltro evidente che la superficie minima per ciascun alunno prevista dalla legge 23/2006 non era garantita.

I valori misurati sono inoltre perfettamente in linea con quanto prevedibile secondo la modalità proposta da Lenzuni e del Gaudio [6] ipotizzando un valore di emissione di anidride carbonica degli alunni di 0,0125 m³/h. Tale risultato conferma anche la buona tenuta all'aria degli infissi e l'assenza di altre infiltrazioni attraverso le strutture murarie..

7 – CONCLUSIONI

Il progetto “Misuriamo la scuola” ha preso avvio nel mese di marzo 2014 e fino ad ora ha coinvolto sette Istituti di scuola Primaria della Provincia di Avellino, permettendo a circa 1000 alunni, di utilizzare strumenti di misura professionali e di applicare realmente le nozioni di fisica studiate sui libri.

Le logiche di contenimento delle spese, utilizzate nella progettazione degli ambienti scolastici, riducono purtroppo sempre di più i volumi a disposizione degli alunni e questo progetto ha avuto il compito di educare alla buona pratica del ricambio dell'aria, con l'apertura periodica delle finestre, che, in assenza di ventilazione meccanizzata, risulta essere l'unica azione in grado di garantire condizioni ottimali di benessere e comfort.

Il valore di t-open, calcolato durante la lezione, ha permesso di lasciare agli alunni ed agli insegnanti, un preciso riferimento temporale da utilizzare, in quella specifica aula, anche in assenza di uno strumento di misura. Salvo i casi più critici, nella maggior parte dei casi aprire le finestre due volte ogni ora risulta sufficiente a garantire condizioni confortevoli. Analizzando anche i risultati di rilevazioni in ambienti di vita, gli alunni hanno potuto comprendere che è necessario ricambiare l'aria anche nelle abitazioni, dove oltre ai bioeffluenti si concentrano altre sostanze volatili provenienti dall'arredamento, dalle vernici e dai prodotti per la pulizia della casa.

La misura dei parametri microclimatici, all'interno dell'aula, ha permesso inoltre di dimostrare che pochi minuti di apertura delle finestre modificano poco il confort

termo igrometrico. In alcuni casi è stato suggerito di modificare il lay-out dell'aula per evitare che gli alunni molto vicini alle finestre fossero investiti direttamente dalla corrente d'aria.

Non tutte le scuole erano dotate di sistemi di regolazione della temperatura dei radiatori dell'impianto a termosifoni ed in alcuni casi l'eccessivo soleggiamento ha fatto registrare valori temperatura superiori a quelli ritenuti confortevoli.

8 – BIBLIOGRAFIA

1. M. del Gaudio et al. " Manuale di buona pratica", Atti del Convegno **dba_incontri 2005** : "Microclima, areazione e illuminazione nei luoghi di lavoro verso un Manuale di buona pratica" 14/09/2005 Bologna
2. Sisto R., Pieroni A., Nataletti P., Fabozzi T., Esposizione a rumore ed intelligibilità del parlato in una scuola elementare del Lazio. Atti del Convegno **dba 2006** (Modena, 12-13 ottobre 2006).
3. Freda D., del Gaudio M., Lenzuni P., 2006. La qualità dell'aria nelle scuole, Atti del Convegno **dba 2006** - vol.2: Microclima, 113 - 125
4. UNI EN ISO 7730- Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale.
5. Paolo Lenzuni, Daniela Freda, Michele del Gaudio "Classification of thermal environments for comfort assessment" Annals of Occupational Hygiene 2009 53(4):325-332.
6. P. Lenzuni e M. del Gaudio, Ventilazione naturale Qualità dell'aria indoor in ambienti non stazionari, CDA Rivista Ufficiale AICARR Associazione Italiana Condizionamento dell'Aria Riscaldamento e Refrigerazione 2005, pag. 46.

MICROCLIMA IN UFFICIO. APPROCCIO PREDITTIVO O ADATTIVO ?

Michele del Gaudio¹, Daniela Freda², Pasquale Capone²

¹: INAIL - Settore Ricerca UOT Avellino

²: INAIL - Settore Ricerca Centro Ricerche Monte Porzio Catone (Roma)

1 - PREMESSA

La generale tendenza ad un uso corretto delle risorse energetiche disponibili, ha orientato i progettisti verso scelte tecniche mirate al risparmio energetico. Alla luce di ciò, molti di loro hanno lasciato l'approccio predittivo, in cui le condizioni termigrometriche sono garantite attraverso l'installazione di impianti di condizionamento, preferendo soluzioni che utilizzano sistemi passivi e non meccanici che sfruttano le potenzialità naturali del sito. Secondo l'approccio adattivo tali scelte sono ancora più convenienti quando consentono al singolo soggetto di gestire direttamente le condizioni termigrometriche del proprio luogo di lavoro. Relativamente alla possibilità di garantire condizioni di comfort ed ottenere un risparmio energetico è ancora in corso il dibattito e le sperimentazioni effettuate sono diverse fra di loro perché fortemente condizionate dalle condizioni climatiche esterne e quindi dalla latitudine. Per i luoghi di lavoro privi di impianti centralizzati per il condizionamento, inoltre, risulta più difficile accertare l'esistenza di condizioni di benessere perché gli indici normalmente utilizzati, basati su un approccio predittivo, non sono in grado di cogliere la soddisfazione degli occupanti derivante dalla possibilità di gestire autonomamente le proprie esigenze termigrometriche.

2 - IL METODO PREDITTIVO

Il Prof. Fanger nel 1982 ha messo a punto una metodica sperimentale chiedendo ad un campione di 1300 soggetti nordamericani adulti in buone condizioni di salute, esposti a condizioni termigrometriche diverse, di esprimere un voto compreso fra -3 e +3 secondo la scala di sensazione termica indicata nella **Tabella 1**.

L'interpretazione dei dati ha permesso di creare un algoritmo illustrato nello standard UNI EN ISO 7730, che permette di prevedere il voto medio PMV (Predicted Mean Vote) che un campione di persone esprimerebbe in un certo ambiente a partire dai parametri fisici misurabili. Per un certo ambiente è possibile associare ad ogni valore di PMV compreso nell'intervallo (+3) + (-3) un valore di PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) che esprime la percentuale di soggetti

insoddisfatti. Vengono individuate tre classi (A-B-C) per le quali è possibile ritenere soddisfacenti le condizioni microclimatiche se viene calcolato un PMV rispettivamente $< |0,2|$ per la classe A, $< |0,5|$ per la classe B, e $< |0,7|$ per la classe C. Il valore di PPD per le tre classi è rispettivamente $PPD < 6\%$ per la classe A, $PPD < 10\%$ per la classe B, e $PPD < 15\%$ per la classe C.

Tabella 1: Scala sensazione termica UNI EN ISO 7730

Voto	Sensazione termica
+3	Molto caldo
+2	Caldo
+1	Leggermente caldo
0	Neutro
-1	Leggermente freddo
-2	Freddo
-3	Molto Freddo

3 - IL METODO ADATTIVO

Il fondamento di questo metodo è nella possibilità che ha il lavoratore di interagire con il proprio ambiente.

Secondo tale modello il lavoratore consciamente o inconsciamente fa delle scelte in base alle sue esperienze che gli permettono di raggiungere più facilmente la soddisfazione nei confronti del microclima.

Si distinguono tre tipi di adattamento:

Comportamentale: azioni che modificano il bilancio termico del corpo umano (abbigliamento, on/off condizionatore, modifica livello di attività);

Fisiologico: (genetico o acclimatamento) una prolungata esposizione a condizioni climatiche aumenta la tollerabilità;

Psicologico: alterate percezioni del clima dovute ad esperienze passate o ad aspettative (controllo sull'ambiente aspettative rilassate).

In numerosi studi effettuati successivamente è emerso che l'adattamento si realizza soprattutto con azioni comportamentali, mentre non sempre è dimostrata una relazione fra esposizioni a condizioni diverse ed effetti fisiologici. Anche la relazione psicologica fra esperienze termiche e adattamento comportamentale non è sempre evidente.

Il progetto RP-884 commissionato dall'ASHRAE nel periodo 1995 – 1997 al Prof. R. De Dear sviluppò il metodo adattivo, raccogliendo ben 22.000 set di dati tra quelli già disponibili e quelli direttamente misurati. I dati si riferivano a 160 edifici, ubicati in varie località nel mondo, distinti in edifici ventilati meccanicamente (Edifici HVAC) e ventilati naturalmente (Edifici non HVAC). Furono somministrati dei questionari, per rilevare la sensazione termica, da cui risultò che gli occupanti di ambienti con impianti centralizzati di condizionamento erano poco suscettibili alle variazioni della temperatura esterna, e che la sensazione termica concordava, a meno di piccole differenze, con quanto previsto dal metodo predittivo (PMV) (Figura 2,

grafico di sinistra). Per gli ambienti a ventilazione naturale il progetto evidenziò che gli occupanti erano maggiormente disposti ad accettare condizioni peggiori rispetto al modello predittivo (Figura 2, grafico di destra).

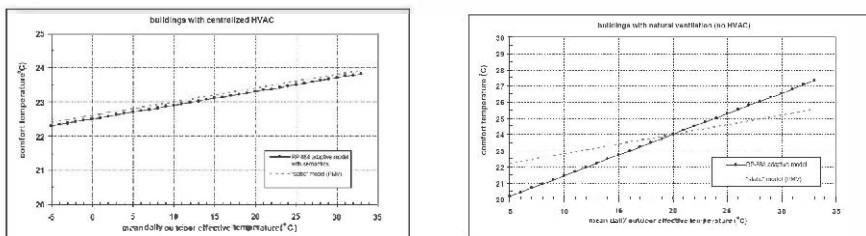
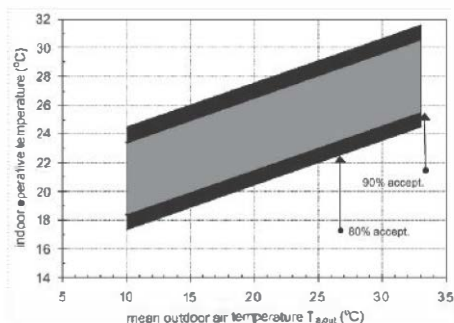


Figura 2: Confronto modello statico (PMV) e modello adattivo Progetto RP-884.

Il metodo adattivo è rappresentato da un algoritmo di correlazione tra la temperatura ritenuta di comfort dagli occupanti di un edificio (T_o operativa) e la temperatura dell'aria esterna (T_{em}). Individuando dei livelli di soddisfazione da raggiungere vengono distinte due classi di comfort corrispondenti ad un range di accettabilità del 90% o dell' 80% di ore di benessere per edifici con impianto centralizzato (Figura 3)



$$T_{co} = 0,31 \times T_{out} + 17,8$$

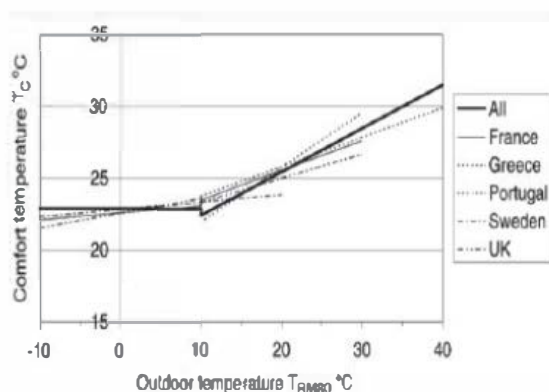
PD 10% per $T \pm 2,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 PD 20% per $T \pm 3,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Figura 3: Modello adattivo per edifici ventilazione naturale ASHRAE (De Dear, Brager).

Il modello è stato successivamente aggiornato per ambienti privi di condizionamento centralizzato da McCartney e Nicol [7] per il clima europeo (Figura 4).

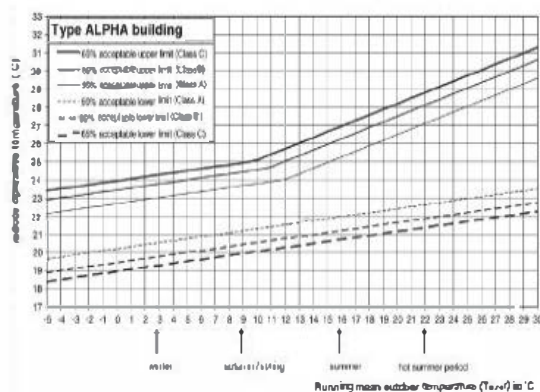
De Dear e Van DerLinden [8] hanno proposto una versione per il clima olandese (Figura 5).

Ed infine lo standard UNI EN 15251 ha fornito una ulteriore versione (Figura 6).



$$T_{\infty} = 0,321 \times T_{out} + 19,39$$

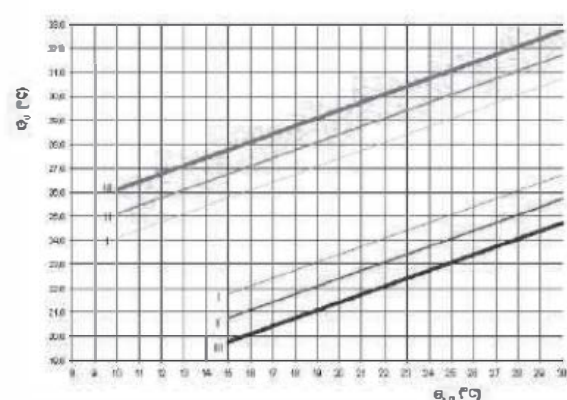
Figura 4: Modello adattivo per edifici ventilazione naturale ACA (McCartney, Nicol)



$$T_{\infty} = 0,31 \times T_{out} + 17,8$$

PD 10% per $T \pm 2,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 PD 20% per $T \pm 3,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 PD 35% per $T \pm 4,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Figura 5: Modello adattivo per edifici ventilazione naturale ATL De Dear Van DerLinden



$$T_{\infty} = 0,33 \times T_{out} + 18,8$$

per $T \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, Categoria I
 per $T \pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$, Categoria II
 per $T \pm 4 \text{ }^{\circ}\text{C}$, Categoria III

Figura 6: Modello adattivo per edifici ventilazione naturale CBN

4 – DISCUSSIONE

Numerosi studi si sono occupati in questi anni di verificare la convenienza di utilizzare un approccio predittivo o adattivo nella progettazione di un luogo di lavoro. Alcuni hanno anche provato a verificare la possibilità di far coesistere i due modelli. Recentemente l'ENEA ha proposto una analisi critica degli indicatori proposti dallo standard tecnico UNI EN 15251 per la valutazione del comfort termico indoor [4], i cui risultati hanno confermato la difficoltà a sovrapporre i vari metodi che in certi intervalli forniscono risposte completamente opposte (Figura 7).

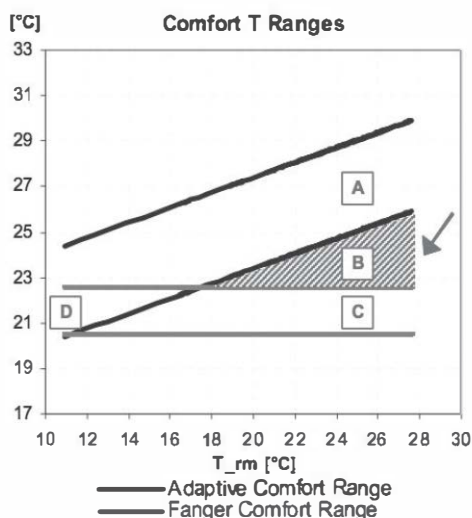


Figura 7: Confronto tra gli intervalli di comfort del modello di Fanger (note alcune ipotesi) e modello adattivo relativi alla categoria II

Precedenti esperienze [9] avevano evidenziato la possibilità di sovrapporre i modelli ma una discreta corrispondenza si ottiene solo allargando la fascia di tollerabilità del PMV al 20% di insoddisfatti. Analogamente a quanto avviene per il mantenimento dei requisiti ottimali di qualità dell'aria [10] [11] gli edifici più vecchi garantiscono performance migliori durante la stagione estiva (in raffreddamento) e permettono anche più facilmente di adottare soluzioni e strategie di mitigazione. Gli stringenti requisiti delle leggi per il risparmio energetico, hanno portato ad aumentare l'isolamento dell'involucro edilizio a cui va ad aggiungersi l'effetto radiante delle ampie vetrate ed in questi casi i risparmi energetici invernali possono essere vanificati da maggiori costi nella stagione estiva.

In zone climatiche moderate dell'emisfero settentrionale [12] [13] modelli di comfort adattivo sono risultati applicabili solo nel periodo maggio-settembre, mentre nel periodo invernale le temperature esterne sono risultate troppo basse. Su base annua il risparmio energetico in edifici naturalmente ventilati o ad elevato controllo da parte degli occupanti non supera il 10 % mentre non è conveniente in edifici HVAC centralizzati.

5 - CONCLUSIONI

Le condizioni termo igrometriche di un luogo di lavoro possono essere stimate con una certa precisione dal progettista che adotta un metodo predittivo, perché il bilancio dell'involucro edificio viene completamente compensato dall'installazione di impianti opportunamente dimensionati. La realizzazione non a regola d'arte e soprattutto le modifiche alla destinazione d'uso possono in alcuni casi influire in maniera rilevante sulle condizioni finali.

Il discorso diventa più complesso se si sceglie di adottare un approccio totalmente o parzialmente adattivo perché si considera una partecipazione attiva dei lavoratori ed è quindi fortemente influenzata da scelte soggettive e soprattutto dalle condizioni termo igrometriche esterne. Il discorso va poi ulteriormente affrontato in caso di ristrutturazioni dove le modifiche in direzione dell'approccio adattivo sono possibili solo se gli interventi sono rilevanti [11].

Soluzioni progettuali di bioarchitettura e comunque tutto ciò che permette di recuperare risorse energetiche disponibili, consentendo di ridurre i consumi, è maggiormente legato ad una visione adattativa che per definizione considera accettabili condizioni di comfort più vicine alle condizioni esterne rispetto ad una applicazione ortodossa dei modelli predittivi.

Prendendo in considerazione la temperatura esterna, la variabilità delle condizioni climatiche nonché sistemi di controllo e sistemi passivi di scambio termico dell'edificio con l'ambiente, l'approccio adattivo in fase di progettazione meglio si concilia i criteri di risparmio energetico di cui alla Direttiva Europea 2002/91/CE.

Di fatto la qualità energetica di un edificio è strettamente correlata alla qualità microclimatica, attesa o conseguita, all'interno dell'edificio stesso.

La Direttiva Europea 2002/91/CE sul rendimento energetico nell'edilizia, prevede che alla classe energetica di un edificio venga abbinata una indicazione del livello di qualità ambientale correlato. Una progettazione mirata al contenimento dei consumi, nello spirito della Direttiva Europea 2002/91/CE sulla certificazione energetica degli edifici, non può prescindere dalla valutazione del livello di qualità ambientale atteso o conseguito all'interno degli edifici.

Gli autori che hanno cercato di quantificare i vantaggi economici di scelte progettuali diverse hanno evidenziato la difficoltà di garantire durante l'anno prestazioni significative sia in raffreddamento che in riscaldamento ed in molti casi il bilancio complessivo sull'intero anno non ha mostrato guadagni significativi.

A questo punto sembra logica la conclusione che nel futuro è auspicabile che sia l'approccio adattivo a condurre il progettista nella definizione dell'ambiente lavorativo in maniera tale da conciliare più facilmente gli obiettivi: da un lato garantire il comfort (le temperature richieste dal comfort adattivo sono maggiori e più flessibili di quelle di Fanger), dall'altro rispondere efficacemente alle disposizioni legislative in materia di risparmio energetico.

E' auspicabile che in presenza di sistemi di controllo personalizzato del microclima, il valutatore delle condizioni di comfort di un luogo di lavoro, nella sua valutazione, prenda in considerazione anche il grado di soddisfazione degli occupanti.

6 – BIBLIOGRAFIA

1. R. de Dear, G. Brager, D. Cooper. Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference. Final Report ASHRAE RP-884. March 1997.
2. EN 15251:2007 (*Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*).
3. UNI EN ISO. 7730:2005. Ergonomia degli ambienti termici – Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale.
4. Direttiva 2002/91/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 16 dicembre 2002, sul rendimento energetico nell'edilizia. GU L 1 del 04.01.2003.
5. F.R. d'Ambrosio Alfano, B.I. Palella, G. Riccio. Thermal Environment Assessment Reliability Using Temperature-Humidity Indices. *Industrial Health*, 49, 95-106. 2011
6. Lenzuni P., Freda D., Del Gaudio M. Classification of Thermal Environment for Comfort Assessment. *Ann. Occup. Hyg.*, vol. 53, No. 4, pp. 325-332. 2009.
7. K. J. McCartney, J. F. Nicol - Developing an adaptive control algorithm for Europe - *Energy and Buildings* 34 (2002) 623–635
8. L. Peeters, R. de Dear, J. Hensenc, W. D'haeseleer - Thermal comfort in residential buildings: comfort values and scales for building energy simulation. *Applied Energy*, 86(5), 772-780.
9. W. van der Linden, M. Loomans, J.Hensen - Adaptive thermal comfort explained by PMV- Proceedings of the 11th international Conference on Indoor Air Quality and climate, Copenhagen 2008.
10. Daniela Freda, Michele del Gaudio, P. Lenzuni "Indoor Air Quality in environments with anthropogenic pollution-descriptor and limit values" *Ital. J. Occup. Environ. Hyg.*, 2010, 1(1) | 33 – 39
11. S. Ferrari, V. Zanutto. Fabbisogno energia termica negli edifici per uffici: gli involucri da ieri ad oggi. *Costruire in laterizio* n 147 giugno 2012
12. J. Van Hoof, J.L.M. Hensen, Quantifying the relevance of adaptive thermal comfort models in moderate thermal climate zones, *Building and Environment*, 42(1), pp. 156-170. 2007.
13. M. G. Sourbron, L. M. Helsen -Evaluation of adaptive thermal comfort models in moderate climates and their application to office buildings equipped with Thermally Active Building Systems (TABS). *Energy and Buildings* 43, (2–3), pp 423–432 .2011
14. S. P. Corgnati, R. Ansaldi, M. Filippi. Ipotesi per un modello di valutazione del comfort termico per la classificazione della qualità dell'ambiente interno. 61° Congresso Nazionale ATI – Perugia 12-15 Settembre 2006.

**INTERVENTI TECNICO FUNZIONALI FINALIZZATI ALLA
RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA DEL DIPARTIMENTO
PROVINCIALE ARPACAL DI CROTONE: VALUTAZIONI IN TEMA DI
MIGLIORAMENTO DEL COMFORT TERMICO DEI LAVORATORI**

Pietro Paolo Capone, Salvatore Ferro, Francesco Italiano

ARPACAL – Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Calabria

1 - PREMESSA

Nel mese di dicembre 2013, si sono conclusi i lavori di riqualificazione energetica del Dipartimento Provinciale ARPACAL di Crotone. I lavori, finanziati con una linea di intervento riconducibile al programma POR-FESR 2007 - 2013, hanno riguardato interventi sia di tipo strutturale, con la sostituzione di tutti gli infissi e la riorganizzazione/rimodulazione di alcuni ambienti interni, che interventi di tipo tecnologico, con la realizzazione ex novo di un impianto di condizionamento/climatizzazione ad alta efficienza.

Gli interventi eseguiti, hanno consentito il salto di classe energetica, garantendo il passaggio dalla classe energetica originaria ossia la G alla classe energetica B. Inoltre, in considerazione che l'unica fonte energetica necessaria per il fabbisogno dell'edificio è esclusivamente quella elettrica, di fatto l'edificio è da intendersi in classe A+ in quanto l'intero fabbisogno energetico è garantito da un impianto fotovoltaico di 145 KW preesistente i lavori di riqualificazione.

Per ciò che riguarda il condizionamento dell'edificio, si è passati dal 19% del volume complessivo dell'immobile, realizzato essenzialmente con sistemi split di tipo puntuale esclusivamente negli uffici, al 100% del volume tramite un sistema centralizzato tipo VRF.

Inoltre per le dorsali laboratoristiche chimico-bionaturalistiche, che rappresentano circa il 35% dell'intero volume dell'edificio, è stato installato un impianto di climatizzazione a tutt'aria con recupero di calore per assicurare il corretto numero di ricambi d'aria.

Durante il primo anno di esercizio dicembre 2013 – dicembre 2014 è stato effettuato un monitoraggio relativo agli indici termici/energetici dell'edificio, e parallelamente è stato valutato per le diverse stagionalità, il comfort termico di tutti gli operatori che occupano i diversi ambienti del Dipartimento.

In particolare sono stati scelti alcuni ambienti campione e su questi sono state effettuate periodicamente delle misure di microclima per valutare effettivamente nei diversi periodi dell'anno il benessere termico per gli operatori (impiegati e laboratoristi), unito alle prestazioni globali energetiche di edificio.

Dal confronto sui consumi energetici ante – post operam, si è osservato un effettivo abbattimento in termini di KWh.

Ma è dalla valutazione dei parametri microclimatici all'interno dell'edificio, che si è notato un eccezionale miglioramento del benessere termico dei lavoratori, soprattutto nel periodo estivo, assolutamente non paragonabile a quanto avveniva prima degli interventi di risanamento energetico.

In questo studio si vuole evidenziare proprio come accanto ad esigenze di tipo funzionale, un intervento pensato per ottimizzare i costi di esercizio di un immobile (in termini di risparmio energetico), abbia avuto indirettamente un miglioramento del comfort termico per gli operatori, sia nella stagione invernale che estiva.

2 - PRINCIPALI OPERE RELATIVE ALL'INTERVENTO

Nel periodo settembre 2011-dicembre 2013 è stato dato corso da parte di ARPACAL, per come indicato in premessa, ad una importante opera di riqualificazione energetica interamente finanziata tramite una linea di intervento POR CALABRIA FESR 2007/2013 ASSE II – ENERGIA OBIETTIVO SPECIFICO 2.1 LINEA DI INTERVENTO 2.1.2.1 – dal titolo “Realizzazione degli interventi per il miglioramento dell'efficienza energetica ed il risparmio energetico dell'edificio di proprietà adibito a Dipartimento Provinciale di Crotone e delle relative pertinenze”.

Le opere in questione hanno essenzialmente riguardato:

- interventi di tipo impiantistico ossia:

Realizzazione dell'impianto di climatizzazione VRF; Realizzazione dell'impianto di condizionamento; Realizzazione dell'impianto elettrico e di illuminamento; Posizionamento delle serrande elettriche; Posizionamento degli scaldacqua istantanei per ACS (acqua calda sanitaria);

- interventi finalizzati al risparmio energetico quali:

Rimozione e sostituzione di tutti gli infissi; Posa in opera di tutte le opere edili interne previste per la rimodulazione degli ambienti ossia: Realizzazione Pareti in cartongesso; Realizzazione controsoffittature; Posizionamento di tutte le porte;

- opere accessorie come:

Ricoprimento di tutti i canali aeraulici; Realizzazione di tutte le opere esterne a servizio dell'impianto di climatizzazione in particolare: realizzazione della platea in c.a. per il posizionamento delle macchine esterne; realizzazione della perimetrazione dell'intera area con rete metallica elettrosaldata; chiusura degli scavi per l'attraversamento delle tubature per il funzionamento dei VRF interni; collegamenti elettrici ed elettronici.

Da come si può valutare dal confronto tra le successive **Figure 1 e 2** le opere in questione hanno anche un notevole valore architettonico in quanto dalla facciata dall'edificio sono state rimosse tutte le macchine esterne precedentemente installate per gli split di climatizzazione puntuale (solo locali uffici)



Figura 1: immobile ante operam



Figura 2: immobile post operam

3 - MATERIALI E METODI DI CALCOLO DEL COMFORT TERMICO DEGLI OPERATORIE DELLE PRESTAZIONI ENERGETICHE

Per la verifica realizzativa dei punti indicati in precedenza, sono state effettuate, nel corso del 2014, soprattutto per la verifica dell'effettivo risparmio energetico realizzato, specifiche prove sui materiali e sulle apparecchiature installate per come previsto dalle vigenti normative di settore, da apposite norme tecniche e da quanto previsto dal Capitolato Speciale d'Appalto. Per gli impianti di climatizzazione, condizionamento e produzione di ACS, le prove di funzionamento sono state inoltre condotte secondo quanto indicato dalle specifiche previste dai diversi libretti di uso e manutenzione. Di seguito si propongono i risultati delle indagini effettuate sugli impianti tecnologici.

3.1 - VERIFICA DELL'IMPIANTO DI CLIMATIZZAZIONE

L'impianto installato dalla ditta esecutrice risponde alle specifiche previste in fase progettuale trattandosi di un impianto tipo VRF e si compone di due blocchi realizzativi di cui uno esterno, caratterizzato da 3 unità moto condensanti, per la generazione del caldo e del freddo, e di un sistema distributivo composto da 50 unità interne per la termoregolazione dei locali adibiti ad ufficio, laboratori e foresteria. A corredo dell'impianto di climatizzazione, sono stati posizionati tre controller per la gestione in automatico delle principali operazioni di conduzione dell'impianto, oltre quelle caratteristiche delle funzioni di timer (giornaliero, settimanale mensile, ecc.). Per la verifica del corretto funzionamento dell'impianto, appurato che tutte le componenti sono state dimensionate e posizionate come da progetto esecutivo, si è provveduto ad effettuare tramite un rilevatore termo igrometrico Mod. RS e di una centralina microclimatica mod. BABUC/A, prodotta

dalla ditta LSI, una serie di prove per la verifica delle condizioni microclimatiche all'interno dei diversi locali. I dati acquisiti tramite la centralina microclimatica, sono stati opportunamente elaborati con un programma di calcolo (Infogen evoluto) direttamente su PC. In particolare i parametri di temperatura ed umidità relativa sono stati monitorati tramite le seguenti sonde a corredo della centralina: sonda BST 131 globotermometrica, sonda BSU 221 psicrometrica, sonda BSV 101 anemometrica a filo caldo.

Specifiche di misura

Ogni sonda applicata alla centralina, è caratterizzata da una "rata" di acquisizione, cioè da un determinato intervallo di tempo entro il quale la centralina registra l'eventuale variazione del parametro da misurare. In particolare, per la misura della velocità dell'aria si è ritenuto opportuno tarare la "rata" di acquisizione a 10 secondi, intervallo sufficiente al fine di valutare eventuali variazioni della grandezza in questione.

Per le altre sonde si è mantenuta una "rata" di acquisizione di 30 secondi. Le misure hanno avuto durata di 4 minuti, e al fine di una corretta rappresentazione dei dati si è limitato l'intervallo di misura a 2 minuti, rinunciando al minuto iniziale e finale di misura per limitare al minimo eventuali problemi di adattamento della strumentazione.

Per la valutazione delle condizioni ambientali si è provveduto ad effettuare un rilievo iniziale ed uno finale della durata di 30 minuti previo condizionamento ambientale delle sonde.

Al fine di valutare il benessere termico all'interno degli uffici, si è proceduto alla determinazione, secondo la norma UNI-EN-ISO 7730:2006, "Moderate thermal environments. Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort", degli indici di Fanger.

Tali indici, indicati con gli acronimi PMV e PPD, rappresentano due parametri in grado di valutare le sensazioni dovute ad un eventuale discomfort termico, correlate alle effettive condizioni microclimatiche presenti in un ambiente di lavoro.

Per il calcolo del PMV (Voto Medio Previsto) e del PPD (Percentuale Prevista di Insoddisfatti), per come precedentemente esposto, non si valutano soltanto i parametri microclimatici, ma un complesso di parametri legati alla soggettività degli individui che operano in un dato ambiente. Particolare importanza rivestono i valori di MET che indicano il dispendio metabolico legato ad una particolare attività e il CLO, parametro che indica l'isolamento termico legato al particolare tipo di vestiario indossato.

Il PMV è valutato secondo una scala di valori che va da -3 a +3 dove la differenziazione di valori è data dalle sensazioni termiche che vanno da una percezione: di freddo(-3) ad un valore di neutro(0) ad un valore di caldo (+3)

Il PPD invece indica convenzionalmente la percentuale di soggetti che in un dato ambiente esprimerebbero un voto relativamente al PMV oscillanti tra a -2 e -3 oppure tra +2 e +3, quindi giudizi di discomfort termico molto negativi. Sperimentalmente per valori di PMV=0, c'è comunque una percentuale di insoddisfatti pari a circa il 5% del totale. Tale valore, man mano che si hanno valori di PMV diversi da zero, cresce molto rapidamente.

Le norme di riferimento non individuano univocamente quale debba essere il valore di PMV o del PPD, ma prevede che ambienti termicamente accettabili siano quelli che garantiscano per gli indici di Fanger i seguenti intervalli:

PMV compreso tra -0.5 e $+0.5$ --- PPD $< 10\%$.

Prima di procedere alla valutazione del corretto funzionamento dell'impianto di climatizzazione e del benessere termico degli operatori, si è tenuto conto delle condizioni atmosferiche esterne, misurando i parametri di temperatura, velocità del vento e umidità relativa.

Modalità operative

Per la verifica degli indici termici, come indicato in precedenza, si sono individuati alcuni "ambienti campione", considerati quali più rappresentativi per dislocazione e destinazione d'uso per l'uniformazione di tali parametri a tutti i restanti ambienti lavorativi. In particolare sono stati individuati come ambiente campione i seguenti:

Piano terra ufficio lato ingresso – *Esposizione Lato SUD*

Piano Terra Laboratorio Chimico - *Esposizione Lato SUD*

Piano Terra Laboratorio Biotossicologico n°2 - *Esposizione Lato NORD*;

Piano Primo Ufficio Direzione - *Esposizione Lato NORD*;

Piano Primo Ufficio Adiacente ingresso lato ascensore (nuovo ambiente) *Esposizione Lato NORD*;

Per la corretta valutazione degli indici termici, per gli operatori impiegati negli ambienti monitorati, in cui sono svolte attività di ufficio e laboratoristiche, si è considerato un dispendio metabolico comune a tutti gli addetti pari a 1,00 MET, e per l'isolamento termico un valore di 0.90 CLO per il periodo invernale;

Risultati Ottenuti

La successiva **Tabella 1** riepiloga i risultati delle diverse misure effettuate in una giornata tipo invernale per la valutazione degli indici caratterizzanti il comfort termico dei diversi operatori (presenza di lavoratori sia maschili che femminili).

Per tutti gli ambienti monitorati, si specifica che al momento delle misure l'impianto di climatizzazione risultava essere spento per poi essere azionato ed impostato ad una temperatura, comune per tutti i VRF, di 22 °C.

Tabella 1: Andamento dei parametri microclimatici di una giornata invernale

Ambiente campione	T in °C	Urel in %	T Fin °C	Urel in %	PMV	PPD
Piano terra ufficio lato ingresso	16,5	56,8	22,5	44,0	0,32	6,51
Piano Terra Laboratorio Chimico*	15,5	57,0	22,2	43,2	0,35	7,21
Piano Terra Laboratorio Biotossicologico n°2*	15,5	58,7	22,0	44,2	0,34	7,18
Piano Primo Ufficio Direzione	16,0	59,0	22,1	44,4	0,31	6,48
Piano Primo Ufficio	16,5	56,0	22,5	42,1	0,29	6,43

* Per i locali adibiti a laboratorio, sia quello chimico che biologico, il calcolo del PMV e del PPD tiene conto del valore della velocità dell'aria per come indicato nei successivi paragrafi sulla valutazione dell'impianto di condizionamento.

Dalla tabella si evince come per i valori di temperatura ed umidità relativa ci sia una sostanziale isoterminia in tutti gli ambienti monitorati, sia prima che dopo l'accensione delle macchine di climatizzazione. I valori di PMV e PPD sono del tutto in linea con il periodo stagionale monitorato ed indicano un sostanziale comfort termico per i lavoratori in tutti gli ambienti monitorati. Il transitorio per il raggiungimento della temperatura impostata dipende dalla cubatura degli ambienti esaminati, passando da pochi minuti (circa due) per gli ambienti più piccoli ad alcuni minuti (circa cinque) per gli ambienti più grandi.

Come dato finale da considerare è quello delle condizioni esterne in cui nella giornata esaminata, un lunedì successivo a due giorni di completa chiusura degli uffici, sono quelli indicati nella successiva **Tabella 2**.

Tabella 2: Parametri climatici di giorno 16 dicembre 2013

Parametri climatici		TR Diurno h: 09,50	TR Diurno h: 12,40
Temperatura	°C	12,00	16,00
Velocità dell'aria	m/s	3,7	4,0
Umidità relativa	UR %	59,0	53,4

Durante questa prova di funzionamento dell'impianto di climatizzazione, sono stati messi in funzione tutte le macchine interne, impostando un funzionamento invernale a 22 °C, tramite i tre controller posizionati nel locale macchine. Per le macchine esterne si è verificato il corretto funzionamento con lo stacco periodico al raggiungimento delle temperature impostate sulle macchine interne.

3.2 - VERIFICA DELL'IMPIANTO DI CONDIZIONAMENTO

L'impianto di condizionamento realizzato all'interno del Dipartimento di Crotone è caratterizzato da quattro unità di trattamento dell'aria indipendenti, posizionati in un locale appositamente attrezzato, a servizio delle dorsali laboratoristiche chimico e bionaturalistico.

In particolare le macchine per il trattamento dell'aria, così come previsto dalle specifiche contrattuali, sono del tipo senza ricircolo ma con recupero di calore. Le macchine che servono i diversi laboratori posti al piano terra (laboratori bionaturalistici e chimici) ed anche al primo piano (laboratori chimici), risultano essere indipendenti l'una dall'altra e ciò consente una estrema modularità nel funzionamento che, grazie a quattro controller, garantisce condizioni di funzionamento estremamente variabili in funzione delle reali necessità operative dei diversi laboratori.

Specifiche operative

Per la verifica del corretto funzionamento dell'impianto di condizionamento, con particolare riferimento alle specifiche sui ricambi d'aria previsti in fase progettuale, oltre alle citate centraline microclimatiche citate in precedenza, si è utilizzato un anemometro a filo caldo di precisione della ditta TESTO. Oltre a queste

strumentazioni necessarie per le valutazioni sui parametri della qualità dell'aria come temperatura, umidità relativa, velocità dell'aria, si è utilizzato anche un fonometro integratore di Classe 1 per il calcolo dei dB, nei diversi ambienti in cui sono collocate le bocchette di mandata/ripresa per la verifica che il rumore dell'aria in transito sia conforme a quanto previsto dalla vigente normativa in tema di tutela sui luoghi di lavoro.

Modalità operative

La centralina microclimatica, tarata come indicato per l'impianto di climatizzazione, è stata posizionata o al centro dei laboratori da monitorare (dove ancora non è stato definito un lay-out definitivo sugli spazi da utilizzare) o in prossimità delle postazione di lavoro.

Le prove sulla velocità dell'aria sono state effettuate direttamente alle bocchette di mandata o ripresa con le alette di deflessione completamente aperte. Inoltre, con l'ausilio di fialette fumogene è stato verificato il livello di turbolenza o laminarità del flusso in uscita oltre che la condizione di sovrappressione per tutti gli ambienti oggetto dell'intervento.

Per le prove relative all'esposizione del rumore, il fonometro è stato posizionato in prossimità delle postazioni di lavoro esistenti o in posizioni ritenute più sfavorevoli per ciò che concerne la propagazione delle onde sonore.

Così come i locali ad uso ufficio, anche i VRF a servizio dei laboratori sono stati posti con una temperatura omogenea di 22 °C. Anche la temperatura di funzionamento delle quattro unità di trattamento aria è stata posta a 22 °C, in modalità di utilizzo invernale, con il sistema di recupero del calore in funzione e con la portata regolabile tramite appositi inverter.

Risultati ottenuti

Nelle successive **Tabelle 3 e 4** si riportano i risultati delle misura effettuate nelle diverse dorsali laboratoristiche.

Tabella 3: Laboratori Bionaturalistici misure di V/aria e portata

laboratorio	Velocità di lancio max	N° ricambi d'aria (min-max)	Sovrapp.	Rumorosità alla massima portata
Biotossicologico 1	3,70 m/s	6-10	Si	30 dB
Biotossicologico 2	6,70 m/s	7-11	Si	47 dB
	6,70 m/s			
Biotossicologico 3	6,80 m/s	7 – 11	Si	49 dB
Accettazione campioni	3,70 m/s	6 - 10	Si	30 dB
Deposito lato spogliatoi	3,40 m/s	6 - 10	Si	30 dB

Tabella 4: Laboratori Chimici piano terra e primo piano misure di V/aria e portata

laboratorio	Velocità di lancio max	N° ricambi d'aria (min-max)	Sovrapp.	Rumorosità alla massima portata
Chimico piano terra 1	3,30 m/s	6-10	Si	37 dB
Chimico piano terra 2	3,30 m/s	6-10	Si	37 dB
	3,20 m/s			
Chimico piano primo	3,20 m/s	6-10	Si	34 dB
	3,20 m/s			

4 - CONCLUSIONI

Il complesso degli interventi effettuati, garantiscono per l'immobile di proprietà ARPACAL il raggiungimento di quelle prestazioni energetiche atte a migliorare la classificazione energetica dell'edificio che, così come indicato nella successiva **Figura 3**, ricavata dopo il monitoraggio di un anno di consumi energetici (dicembre 2013-dicembre 2014) si attesta alla classe energetica "B", ottenendo un miglioramento considerevole in considerazione che la classe energetica precedente agli interventi era la "E".

Ma è dalle valutazioni sul comfort termico per gli operatori che si hanno risultati per certi versi sorprendenti in quanto, l'omeoterma che si viene a creare in tutto

"PROGETTO DI RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA PER IL DIPARTIMENTO PROVINCIALE ARPACAL DI CROTONE"				
INTERVENTI REALIZZATI				
1) SOSTITUZIONE DEI SERRAMENTI 2) RIORGANIZZAZIONE FUNZIONALE DI ALCUNI AMBIENTI 3) REALIZZAZIONE DELL'IMPIANTO DI CLIMATIZZAZIONE CALDO/FREDDO 4) REALIZZAZIONE DELL'IMPIANTO DI CONDIZIONAMENTO A SERVIZIO DELLE DORSALI LABORATORISTICHE 5) REALIZZAZIONE IMPIANTO ACS				
PRESTAZIONI ENERGETICHE	ANTEOPERAM	POSTOPERAM		RISULTATI OTTENUTI
Prestazione globale energetica dell'edificio	13.424 KWh/m² anno	6.707 KWh/m² anno		Risparmio energetico 6.717 KWh/m² anno Risparmio percentuale 49,962%
Prestazione energetica per ACS	0	5.111 KWh/m² anno		Miglioramento del 100%
Fabbisogno di energia primaria per riscaldamento dell'edificio	88.120,29 KWh	32.801,902 KWh		Risparmio di energia primaria 55.319,388 KWh Risparmio percentuale 37,224%
EMISSIONI CO2	3,026 KgCO2/m² anno	1.512 KgCO2/m² anno		Riduzione di CO2 1.514 KgCO2/m² anno Abbattimento del 49,967 %
CLASSE ENERGETICA EDIFICIO	E	B	A+**	** Fabbisogno energia primaria interamente soddisfatto da produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile (fotovoltaico) - Classe energetica A+

Figura 3: Calcolo delle prestazioni energetiche

Figura 3: Calcolo delle prestazioni energetiche

l'edificio, rende l'ambiente lavorativo, stante gli indici di Fanger, gradevole con valori di insoddisfazione per i lavoratori che può essere ritenuta del tutto fisiologica. Probabilmente questa condizione è data dalla sinergia di interventi che oltre alle opere impiantistiche ha riguardato la rimodulazione degli ambienti con delimitazioni di ambienti molto grandi in stanze più piccole.

Ciò di fatto ha limitato alcuni fenomeni termici molto particolari in cui si creavano delle vere e proprie bolle termiche che soprattutto in estate, per l'assenza di apparati di climatizzazione determinavano repentini aumenti di temperatura, con aria calda che si diffondeva in tutti gli ambienti.

In conclusione quindi, si può affermare, che le opere di riqualificazione energetica proposte e realizzate per il Dipartimento Provinciale ARPACAL di Crotone, non soltanto rappresentano un fattore di risparmio energetico, ma un valido sistema per l'ottimizzazione del benessere termico di tutti i lavoratori.

4 - BIBLIOGRAFIA

- Baglioni, S. Riardi: "Costruzioni e Salute. Criteri, norme e tecniche contro l'inquinamento interno". Ed. Franco Angeli, 1991.
- Linee guida per la tutela e la promozione della salute negli ambienti confinati (G.U. n.276 del 27 novembre 2001 suppl. ord. n. 252).
- Legge 26/10/95 n° 447 - Legge Quadro sull'inquinamento acustico.
- Decreto 16/03/98 - Tecniche di rilevamento e di misurazione dell'inquinamento acustico.
- Decreto legislativo 81/08 – Testo Unico sulla Salute e la Sicurezza del Lavoro.
- UNI-EN-ISO 7730, "Moderate thermal environments. Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort", (determinazione degli *indici di Fanger*).

MICROCLIMA IN AMBIENTE MODERATO, 2003–2015: IL PUNTO DI 12 ANNI DI ATTIVITÀ ISPETTIVA. STRUMENTI, METODOLOGIE E CRITICITÀ LEGATE ALLA CARATTERIZZAZIONE E VALUTAZIONE DELL'ESPOSIZIONE LAVORATIVA

Pierangelo Tura, Marco Fontana

A.R.P.A. Piemonte – Rischio Industriale ed Igiene Industriale

1 - INTRODUZIONE

Il Titolo VIII del D.Lgs. 81/2008 [1] contiene le disposizioni dedicate alla prevenzione e protezione dei lavoratori dai rischi derivanti dall'esposizione ad agenti fisici. All'art. 180 per la prima volta il microclima viene esplicitamente inserito tra gli agenti di rischio fisico e quindi come tale (ex. art. 181), al pari di tutti i fattori di rischio, deve essere oggetto di valutazione al fine di predisporre le eventuali misure di prevenzione e protezione. In verità anche prima di questa formalizzazione l'esposizione lavorativa al microclima era un problema noto, la cui stima del rischio veniva effettuata ricorrendo a modelli di valutazione e limiti di riferimento, definiti da un'ampia bibliografia di norme tecniche, buone prassi e linee guida. Considerando che il Titolo VIII non contiene un Capo specifico di riferimento dedicato al microclima, dal punto di vista applicativo non è cambiato nulla, in quanto la valutazione del rischio viene effettuata attingendo dagli stessi riferimenti bibliografici, alcuni dei quali opportunamente aggiornati e revisionati nel corso degli anni.

Il settore di Igiene Industriale dell'ARPA Piemonte, in qualità di supporto tecnico dei Servizi di Prevenzione e Sicurezza negli Ambienti di Lavoro (S.Pre.S.A.L.) piemontesi in ambito di rischio chimico, fisico e biologico, ha svolto nel corso degli anni e svolge tuttora diversi interventi di monitoraggio microclimatico in ambienti *moderati* e *severi* legati ad attività di vigilanza e/o progetti di studio e ricerca.

La classificazione dell'ambiente termico è un prerequisito del processo di valutazione, sulla base del quale applicare opportuni modelli previsionali. Un ambiente di lavoro si può definire termicamente *severo* (caldo o freddo), o *vincolato*, quando sussistono esigenze ambientali e/o produttive tali da vincolare uno o più parametri microclimatici e non rendere realisticamente perseguibili le condizioni di comfort termico per gli occupanti. Si definiscono invece *moderati* tutti quegli ambienti in cui non sono presenti situazioni di vincolo e pertanto il raggiungimento del comfort termico è una condizione realisticamente perseguibile. Sebbene la classificazione sia associata all'ambiente di lavoro, i termini *moderato* e *severo* sono riferibili all'entità delle sollecitazioni imposte all'organismo e quindi all'esposizione ipotizzabile in tali ambienti. Negli ambienti *severi* l'obiettivo è la tutela della salute,

in quelli *moderati* l'obiettivo è il raggiungimento del comfort. Tuttavia nei *moderati* la questione non è semplificabile con il fatto che trattandosi di ambienti in cui il fine è il benessere, la tutela della salute può essere data per scontata. In ambito prevenzionistico ogni analisi deve essere ovviamente supportata da un adeguato processo valutativo. Inoltre è tutt'altro che scontato che anche in ambienti *moderati*, come verrà mostrato in seguito, non possano verificarsi a seguito di criticità soprattutto strutturali e/o impiantistiche, condizioni microclimatiche caratterizzate da parametri ambientali compatibili con ambienti *severi*. In questi casi l'esposizione lavorativa potrebbe comportare per l'organismo sollecitazioni ben più elevate di quelle associabili con il discomfort termico, pur in presenza di ambienti non vincolati.

Nel presente lavoro si intende mostrare un resoconto dell'attività negli ambienti di tipo *moderato* effettuata nel corso degli anni, soffermandoci sulle situazioni più significative osservate.

Le indagini e le misurazioni effettuate hanno riguardato un'ampia gamma di tipologie di ambienti: centri commerciali, industrie, uffici, mezzi di trasporto, ecc. L'obiettivo è di analizzare le problematiche più frequentemente riscontrate e fornire se possibile, sulla base delle esperienze in campo e dei risultati ottenuti, gli strumenti per definire una metodologia di riferimento di approccio alla valutazione, indipendente dalla tipologia di ambiente. Ad esempio un aspetto importante è quello di individuare il livello di approfondimento che l'intervento richiede, se e quando sono necessarie misure strumentali e in che modalità dovrebbero essere condotte. Si deve osservare inoltre che i problemi legati alla percezione dell'ambiente termico sono spesso legati a fattori di tipo soggettivo per cui non sempre di facile caratterizzazione.

Infine saranno analizzate le cause all'origine delle criticità più ricorrenti riscontrate in funzione di molteplici fattori correlabili: tipologia del posto di lavoro, tipologia di attività, organizzazione del layout aziendale, presenza o meno di impianti di ventilazione e/o trattamento dell'aria, fattori di stress estranei all'ambiente termico, struttura degli edifici, ecc.

2 - IL MICROCLIMA IN AMBIENTE MODERATO

Con il termine microclima si intende il complesso di parametri ambientali che caratterizzano localmente l'ambiente in cui l'individuo vive e lavora e che congiuntamente a parametri individuali quali l'attività metabolica correlata al compito lavorativo, la resistenza termica del vestiario determinata dalle caratteristiche dell'abbigliamento indossato, condizionano gli scambi termici tra soggetto e ambiente circostante.

La valutazione dell'esposizione al microclima in ambiente di lavoro deve considerare molti fattori che incidono nella determinazione dei parametri oggettivi e soggettivi, attraverso i quali si può definire il livello di comfort termico o benessere termoigrometrico.

Negli ambienti *moderati* l'individuo dovrebbe poter raggiungere la condizione di omeotermia, ovvero di neutralità termica, grazie ad un moderato grado di intervento del sistema di termoregolazione. Gli ambienti *moderati* dovrebbero essere

caratterizzati da condizioni ambientali piuttosto omogenee e stabili nel tempo, assenza di rilevanti scambi termici localizzati fra soggetto e ambiente, attività fisica modesta e simile tra i lavoratori e uniformità del vestiario indossato.

La condizione di benessere termoigrometrico rappresenta quello stato psicofisico in cui il soggetto esprime soddisfazione per l'ambiente termico, oppure dal punto di vista termosensoriale come la condizione in cui il soggetto non ha né sensazione di caldo né sensazione di freddo.

Come già anticipato l'attività di prevenzione può essere condotta facendo riferimento ad una consolidata normativa tecnica che consente di effettuare il processo di valutazione mediante collaudati modelli previsionali [2 ÷ 6].

La stima del livello di comfort termico si traduce nella determinazione dello scostamento delle condizioni termoigrometriche reali da quelle ideali di benessere. In concreto la valutazione viene effettuata mediante gli indici descrittivi PMV-PPD, che sono funzione delle variabili ambientali e personali, introdotti da P.O. Fanger [7] e recepiti nella UNI EN ISO 7730 [3] che rappresenta la norma di riferimento per la valutazione degli ambienti termici *moderati*.

Il modello di Fanger si fonda sull'assunzione di una relazione biunivoca fra bilancio energetico del corpo umano e sensazione termica, supportata empiricamente attraverso l'analisi statistica dei risultati di un'indagine condotta su un campione di quasi 1300 individui. I soggetti sottoposti all'interno di una camera climatica a differenti condizioni ambientali, erano tenuti ad esprimere una valutazione sull'accettabilità del clima indoor attraverso una scala di sensazione termica definita a sette livelli secondo la corrispondenza mostrata in **Tabella 1**.

Tabella 1

VOTO	SENSAZIONE
+3	molto caldo
+2	caldo
+1	leggermente caldo
0	neutro
-1	leggermente freddo
-2	freddo
-3	molto freddo

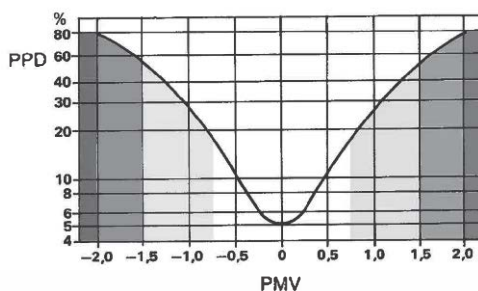


Figura 1

Un microclima confortevole è quello che suscita nella maggioranza degli individui esposti una sensazione di soddisfazione. L'indice PMV (Voto Medio Previsto) rappresenta dunque il voto di un individuo per l'ambiente in cui si trova e deriva dalla media dei voti espressi dal campione posto in determinate condizioni microclimatiche. La variabilità individuale nella percezione dell'ambiente termico determina una certa dispersione dei voti attorno al valore medio. L'indice PPD rappresenta la percentuale di insoddisfatti correlata al PMV (**Figura 1**). È interessante osservare che anche in condizioni di neutralità termica (omeotermia, $PMV=0$) vi sia una percentuale minima di insoddisfatti, che evidenzia la

componente soggettiva nel giudizio dell'ambiente termico e l'impossibilità di realizzare condizioni microclimatiche di comfort per tutti.

Il PMV esprimere una valutazione sul livello di comfort globale, la cui accettabilità è condizione necessaria ma non sufficiente a garantire una situazione di benessere, per la quale deve essere esclusa anche la presenza di sorgenti discomfort locale. Il discomfort locale ha origine da disuniformità delle variabili ambientali che determinano scambi termici localizzati uomo-ambiente. La UNI EN ISO 7730 considera quattro tipologie di disagio locale riferibile rispettivamente a: correnti d'aria, gradiente verticale di temperatura, temperatura del pavimento troppo alta o troppo bassa, asimmetria radiante. Ciascuna è caratterizzata da percentuali di insoddisfatti (PD) correlate ai rispettivi parametri ambientali di riferimento.

In **Tabella 2** è riportato un prospetto riassuntivo dei limiti di accettabilità in termini di percentuali di insoddisfatti per il discomfort globale e locale, per approfondimenti si rimanda alla lettura della norma [3].

Dalla tabella si osserva che al di sotto dei limiti massimi di accettabilità (categoria C) il comfort è suddiviso in tre classi di qualità, introdotte nell'ultima revisione della norma che risale al 2006.

Sebbene la suddivisione in sottocategorie può risultare opportuna perché permette una differenziazione di prestazioni tra tipologie di ambienti diversi, contiene due criticità di carattere applicativo. La prima è che gli intervalli tra una classe e l'altra sono troppo ristretti (in particolare per il PMV) in relazione agli errori strumentali e valutativi a cui sono affetti i parametri microclimatici ambientali e personali [2,8,9,10]. La seconda è che la norma non definisce i criteri con i quali classificare una tipologia di ambiente in una classe piuttosto che in un'altra. Questo aspetto è fondamentale e deve essere un prerequisito ai fini della valutazione [11].

Tabella 2

Categoria	Comfort globale		Comfort locale			
			% insoddisfatti (PD%)			
	PPT,%	PMV	correnti d'aria	gradiente di temperatura verticale	temperatura pavimento	asimmetria radiante
A	< 6	-0.2<PMV<+0.2	< 10	< 3	< 10	< 5
B	< 10	-0.5<PMV<+0.5	< 20	< 5	< 10	< 5
C	< 15	-0.7<PMV<+0.7	< 30	< 10	< 15	< 10

3 - CARATTERIZZAZIONE DEI PARAMETRI MICROCLIMATICI

La valutazione dell'ambiente termico globale è riconducibile alla stima di 6 parametri, 4 grandezze ambientali e 2 personali, rispettivamente: temperatura dell'aria (t_a), temperatura media radiante (t_r), umidità relativa (RH%), velocità dell'aria (v_{ar}), metabolismo energetico (M), resistenza termica del vestiario (I_{cl}).

Come è noto i parametri personali M e I_{cl} , correlabili al compito lavorativo e al vestiario indossato dagli addetti nell'area produttiva in esame, vengono quantificati in modo indiretto correlando quanto osservato nell'ambiente reale a prospetti di

riferimento, i quali riportano valori ottenuti in laboratorio secondo specifiche metodologie di prova. Metodi di misura, valutazione e tabelle per la definizione di M e I_{cl} sono riportate nelle rispettive norme tecniche di riferimento [4,5].

La stima dei parametri ambientali per la valutazione del comfort globale e/o locale, prevede un'acquisizione strumentale in campo, secondo una adeguata pianificazione del monitoraggio che deve tenere in considerazione diversi fattori.

La strumentazione di misura utilizzata durante le indagini, i cui risultati saranno mostrati e discussi nel presente lavoro, è composta da centraline di acquisizione multicanale (LSI – mod. BABUC) alle quali vengono collegate opportune sonde, in funzione della tipologia di misura o problematica da valutare sia essa relativa al comfort termico *globale* o *locale*.

La tipologia di sonde da utilizzare è naturalmente determinata dai parametri ambientali di interesse e quindi dal fatto che si tratti di una valutazione di ambiente termico globale o di disagio localizzato [2,3]. La UNI EN ISO 7726 [2] è la norma di riferimento in cui sono specificati i requisiti minimi che la strumentazione deve soddisfare e i metodi per la misurazione delle grandezze fisiche che caratterizzano un ambiente. Più articolata risulta invece la definizione della strategia di monitoraggio da adottare al fine di ottenere un risultato attendibile dal punto di vista tecnico e rappresentativo del contesto microclimatico in esame.

La prima fase è l'individuazione delle postazioni di misura che devono tenere conto dell'ambiente e delle attività di lavoro presenti per essere correlabili alla reale esposizione lavorativa degli addetti. Il microclima *moderato* ricopre un'ampia gamma di tipologie di ambienti diversificati per caratteristiche strutturali, requisiti energetici, attività produttive, ecc. Diversamente da altri agenti di rischio fisico attualmente non esistono documenti di riferimento (linee guida, standard tecnici, ecc.) su strategie e criteri di conduzione dei monitoraggi finalizzati alla valutazione del (dis)comfort negli ambienti di lavoro. Il fine del monitoraggio strumentale è di fornire una valutazione dell'ambiente termico rappresentativa della realtà lavorativa, cogliendo le condizioni ricorrenti a massimo disagio/rischio, individuare eventuali criticità, le cause che le hanno generate e possibili soluzioni tecniche e/o organizzative. A questo scopo è fondamentale condurre un'accurata indagine conoscitiva preliminare di tutti i fattori che possono avere un'incidenza non trascurabile sulla valutazione. Molti sono riconducibili alle caratteristiche dell'edificio e/o del singolo ambiente, ad esempio può essere rilevante l'orientamento geografico e di conseguenza il soleggiamento, la disposizione degli ambienti interni, la presenza di impianti di ventilazione o trattamento e ricambio d'aria, la disposizione delle relative bocchette o moduli, le superfici in gioco e il relativo affollamento di persone e strumentazione, la dimensione e posizione di eventuali vetrate, ecc.

In merito alla scelta dei punti di misura in termini di posizionamento e quantità si dovrebbero considerare aspetti quali la disposizione delle postazioni di lavoro, fisse o mobili che siano, le dinamiche dello svolgimento del compito lavorativo, l'incidenza delle condizioni ambientali esterne, sia di quelle meteorologiche del momento che di quelle legate alla variabilità stagionale e/o giornaliera. In alcuni casi la valutazione può svilupparsi e concludersi in specifici periodi temporali, oppure può essere necessario ripetere le misurazioni in momenti diversi della giornata e/o dell'anno al fine di avere un risultato completo e rappresentativo.

È importante quindi caratterizzare l'esposizione in funzione della variabilità temporale e spaziale delle condizioni microclimatiche indoor.

Ad esempio se la postazione di lavoro è fissa il punto di misura è facilmente individuabile, nel caso in cui invece il lavoratore debba ricoprire più postazioni o muoversi entro una certa area, si dovranno scegliere un certo numero di punti di misura ritenuti significativi e tali da caratterizzare adeguatamente l'esposizione complessiva.

La durata della misura intesa come "tempo utile" di acquisizione deve tenere in considerazione il tempo di risposta delle sonde, che dipende anche dal sensore utilizzato [2]. Le sonde infatti richiedono un certo periodo di "acclimatamento" pertanto misurando più parametri contemporaneamente, la sonda più "lenta" tra quelle utilizzate sarà determinante sui tempi di acquisizione. Ad esempio il globotermometro usato per la stima della temperatura media radiante nella valutazione del PMV, ha un tempo di risposta di circa (20÷30) minuti, pertanto il campionamento non può prescindere da tale vincolo.

La centralina di acquisizione e le sonde collegate sono montate su un cavalletto treppiede di tipo fotografico, posizionate nella postazione di interesse dell'ambiente in esame, fissate e orientate mediante appositi supporti (**Figura 2**).



Figura 2

In **Tabella 3** sono mostrati i parametri ambientali e personali che concorrono alla determinazione dell'indice PMV e i relativi intervalli (o criteri) di applicabilità nell'ambito dei quali il modello di Fanger risulta validato.

Nel caso in cui uno o più parametri abbiano valori al di fuori di tali intervalli non significa naturalmente che l'ambiente in questione non debba più essere considerato

moderato, in quanto la classificazione è un prerequisito, indica invece la presenza di una criticità correlata ad elevato discomfort. Valori al di fuori di questi limiti e con l'indice PMV prossimo o addirittura oltre i valori di riferimento massimi ($-3 > \text{PMV} > +3$) sarebbero infatti espressione di parametri microclimatici compatibili più con un ambiente di tipo *severo* piuttosto che *moderato*.

Tabella 3

Simbolo	Quantità	Intervallo utile
M	Dispendio energetico metabolico	$0.8 \div 4 \text{ met}$
I_{cl}	Resistenza termica del vestiario	$0 \div 2 \text{ clo}$
t_a	Temperatura dell'aria	$10 \div 30 \text{ }^\circ\text{C}$
t_r	Temperatura media radiante	$10 \div 40 \text{ }^\circ\text{C}$
v_{ar}	Velocità ell'aria	$0 \div 1 \text{ m/s}$
p_a	Pressione parziale di vapore d'acqua	$0 \text{ Pa} \div 2700 \text{ Pa}$

Si osserva infine che la norma stessa [3] raccomanda l'utilizzo dell'indice PMV per valori compresi tra -2 e $+2$; al di fuori di tale intervallo si avrebbe $\text{PPD} > 75\%$ e l'ambiente sarebbe caratterizzato da elevato discomfort tale da ritenere non rappresentativa l'associazione dell'indice PMV con la sensazione termica, in quanto non adeguatamente supportata da evidenze sperimentali.

Infine si deve tenere sempre presente che nella percezione dell'ambiente termico possono influire fattori soggettivi e psicosociali correlati ad elementi di condizionamento esterni (stress lavorativo, difficili rapporti con colleghi e/o superiori, carichi di lavoro eccessivi, scarsa gratificazione, orari di lavoro eccessivi, ecc.). A volte il disagio lamentato, come verrà mostrato in seguito su alcune indagini effettuate nel corso degli anni, è riconducibili a problematiche di questo tipo piuttosto che all'ambiente termico.

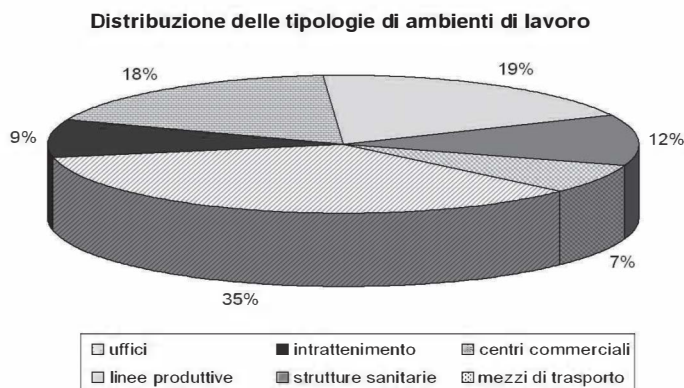
4 - INDAGINI STRUMENTALI – RISULTATI, ANALISI, CRITICITÀ

La valutazione dell'ambiente termico richiede l'analisi e caratterizzazione di una ampia gamma di parametri dipendenti a loro volta da fattori molto variabili da un ambito lavorativo all'altro.

L'attività in campo condotta in questi anni ha riguardato oltre 100 tipologie di ambienti di lavoro che per motivi di semplificazione possono essere suddivisi, in relazione all'attività lavorativa presente, in 6 "gruppi" identificabili come: uffici, locali di intrattenimento, centri commerciali, linee produttive, strutture sanitarie, mezzi di trasporto.

In **Figura 3** viene mostrata la distribuzione dei gruppi sul totale degli ambienti oggetto di indagine, ovvero l'incidenza di ciascuno sull'attività complessiva.

La tipologia di ambiente più frequente risulta essere quella correlabile alle attività d'ufficio, esito d'altra parte prevedibile in un contesto *moderato*. Una percentuale consistente è poi rappresentata dalle attività commerciali e dalle "linee produttive".

**Figura 3**

Con quest'ultima definizione si vuole identificare ambienti di tipo industriale, tali naturalmente da possedere i requisiti per poter essere classificati come *moderati*, in cui viene svolta l'attività produttiva, sia essa manuale di tipo artigianale o con la presenza di linee di lavoro a ciclo continuo.

Infine vi sono ambienti lavorativi inseriti in strutture sanitarie i cui requisiti termoigrometrici e di qualità dell'aria variano e sono più o meno stringenti in relazione alla destinazione d'uso del locale, ad esempio sale di degenza, sale operatorie, laboratori di analisi, ambulatori di pronto soccorso, ecc. Sui mezzi di trasporto le indagini hanno riguardato ambienti spazialmente limitati quali le postazioni o cabine di guida, in particolare relative al settore del trasporto collettivo su rotaia. Il gruppo "intrattenimento" riguarda tipologie di ambienti di lavoro molto differenti in relazione alla destinazione d'uso, tuttavia accomunati da locali di ampia metratura e destinati al ricevimento di elevati flussi di visitatori ad esempio sale gioco, musei, ecc.

Si osserva che per gli ambienti di lavoro che prevedono la presenza congiunta di lavoratori e popolazione come le strutture sanitarie, aree commerciali e di intrattenimento, è opinione di chi scrive che la valutazione dell'ambiente termico dovrebbe essere effettuata tenendo conto di questo aspetto e quindi riferendosi a classi di qualità più elevata. Ad esempio e a maggior ragione per le strutture sanitarie dove in moltissimi ambienti è prevista la presenza di soggetti che possono essere classificati per ovvi motivi come "sensibili", l'ambiente termico non può prescindere dalla classe A, sebbene come abbiamo già ricordato la normativa di riferimento non tenga conto di questi aspetti.

Rielaborando l'analisi presentata in **Figura 3** in funzione del numero di postazioni di misura in ciascun gruppo, intese come misure di ambiente termico globale quindi finalizzate all'elaborazione degli indici PMV-PPD, l'incidenza diventa quella mostrata in **Figura 4**, riferita complessivamente a circa 520 punti di misura.

In questo caso vi è un incremento dell'incidenza degli ambienti di tipo commerciale che congiuntamente agli uffici, la cui percentuale rimane sostanzialmente invariata rispetto al dato di **Figura 3**, rappresentano il 70% delle attività di misura complessivamente effettuate.

Distribuzione del numero dei punti di misura

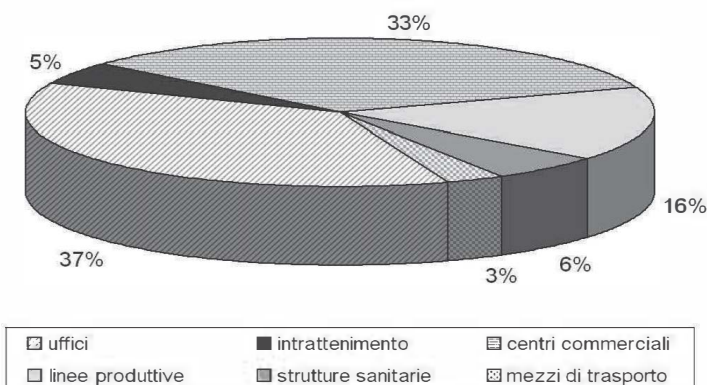


Figura 4

Tale dato risulta attendibile e facilmente interpretabile. Gli uffici sono gli ambienti più frequentemente oggetto d'indagine pertanto è ragionevole anche l'intensa attività strumentale correlata. Gli ambienti commerciali invece, pur in numero inferiore, sono frequentemente composti da locali di ampia metratura la cui caratterizzazione richiede un elevato numero di punti di misura.

Per le linee produttive e locali d'intrattenimento si osserva l'incidenza dell'attività di monitoraggio proporzionale al numero di indagini.

Sui mezzi di trasporto le postazioni di misura hanno riguardato le cabine di guida che, sebbene costituite da spazi molto piccoli che richiedono pochi punti di misura e che farebbero pensare ad una gestione dell'ambiente termico piuttosto semplice, hanno invece evidenziato molte criticità relative a discomfort sia di tipo locale che globale [12].

I locali identificati come "strutture sanitarie" hanno riguardato prevalentemente sale operatorie, di degenza e di diagnosi. In generale si è trattato di locali con superfici piuttosto ridotte e postazioni di lavoro localizzate, dotati di impianti per il controllo dei parametri termoigrometrici e per il ricambio dell'aria. Proprio sugli impianti si sono rilevati frequentemente problemi di efficienza e/o funzionamento non corretto.

L'indagine sull'ambiente termico richiede frequentemente la valutazione congiunta dell'adeguatezza delle prestazioni degli impianti e della qualità dell'aria. Su quest'ultimo aspetto osserviamo che l'enorme varietà delle potenziali sostanze inquinanti rende di fatto impossibile l'individuazione di un indicatore sintetico generale di inquinamento. Tuttavia la concentrazione di CO_2 rappresenta un indicatore di qualità indiretto utilizzabile a completamento della valutazione ambientale. La CO_2 è ritenuta secondo alcuni standard [13,14] ottimamente correlata all'insoddisfazione espressa dagli occupanti di un ambiente, a cui viene unanimemente riconosciuta una buona capacità descrittiva dell'inquinamento indoor di tipo antropico.

Come già introdotto in precedenza la valutazione dell'ambiente termico può richiedere approfondimenti per verificare la presenza di discomfort locali, che nel nostro caso hanno interessato il 40% circa degli ambienti di lavoro, differenziando le

indagine sui quattro fattori di disagio locale come mostrato in figura 5 (in molti casi si è reso necessario effettuare verifiche di più sorgenti contemporaneamente per la stessa postazione).

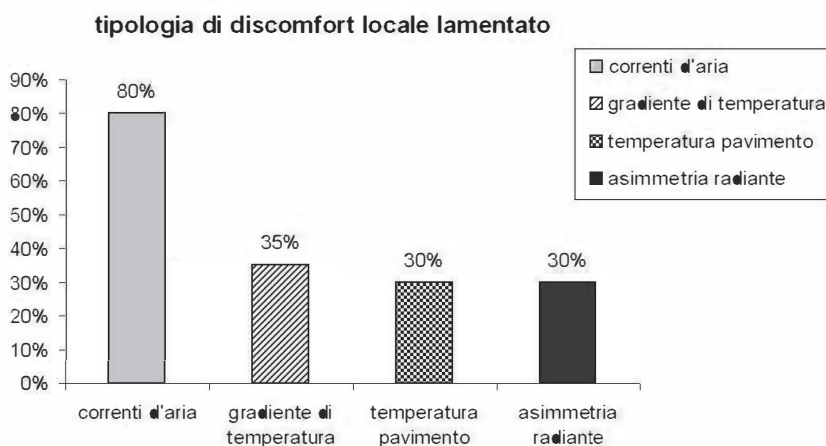


Figura 5

Come si può osservare dalla **Figura 5** il rischio da correnti d'aria è quello più presente e nella quasi totalità dei casi dovuto ai flussi dalle bocchette degli impianti di ricambio e trattamento dell'aria. L'origine del problema è generalmente una cattiva gestione del layout di lavoro e la mancata razionalizzazione delle postazioni di lavoro in funzione delle bocchette in fase di progettazione dell'ambiente lavorativo.

A volte il problema è superabile anche a posteriori con interventi sia di tipo logistico, mediante la ridefinizione delle postazioni, sia tecnico, mediante l'applicazione di deviatori di flusso dell'aria e/o schermi protettivi. A volte invece le situazioni sono state talmente mal gestite in fase progettuale che i tentativi di attuare interventi migliorativi accentuano le problematiche esistenti o ne generano di nuove. Una situazione sorprendentemente riscontrata in più di un'occasione è stata quella di ambienti di lavoro in cui venivano chiuse porzioni di impianto/bocchette al fine di eliminare il rischio da correnti d'aria in determinate aree. Tale azione, totalmente inadeguata e priva di giustificazione, genera inevitabilmente problemi legati ad aria di rinnovo insufficiente, notevole incremento della concentrazione di CO₂, peggioramento della qualità dell'aria e dei parametri termoigrometrici.

Gli altri fattori di disagio localizzato sono invece sempre correlati in qualche modo alla presenza di sorgenti di calore o di elementi di superficie caldi o freddi. Quest'ultimo caso è frequente in quegli edifici a vetrate "sigillati" dove è fondamentale l'esposizione della parete che diventa la sorgente di discomfort "fredda" o "calda" soprattutto per quelle postazioni posizionate nelle vicinanze. Spesso queste sorgenti non generano solo problemi di tipo locale ma sono di tale entità che influenzano negativamente l'ambiente termico globale.

Attuare la misura e stima dei parametri microclimatici e definire gli indici descrittivi è un'operazione non sempre indispensabile e soprattutto non rappresenta il fine

ultimo della valutazione. Ad esempio nel 17% degli interventi effettuati l'indagine si è conclusa senza l'ausilio di misurazioni in campo. In tanti casi le motivazioni per non procedere con accertamenti strumentali sono riconducibili a carenze palesi e oggettive di varia natura, ad esempio strutturali, di layout e organizzazione del lavoro, di tipo impiantistico, spazi di lavoro insufficienti; in tali casi si rende necessaria l'immediata individuazione e attuazione di misure di rimedio.

Un'altra situazione in cui le misure non servono è quando il microclima non è di fatto all'origine dei problemi lamentati. Si osservino ad esempio i valori di PMV mostrati in **Figura 6**. Si riferiscono a indici di Fanger derivanti da misurazioni in diverse postazioni di lavoro al piano terra e piano interrato di un centro commerciale. Colpisce che i valori rilevati siano tutti espressione di ambienti termici buoni – ottimali, a fronte di diverse segnalazioni di malessere e problemi da parte dei lavoratori.

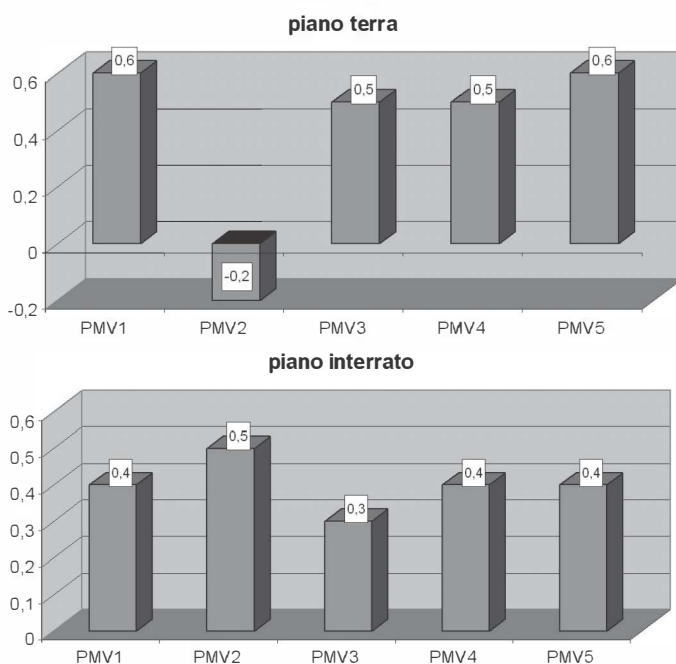


Figura 6

Effettuando indagini più approfondite è emerso come gli elementi di disagio presenti erano determinati da rapporti conflittuali tra il personale, organizzazione del lavoro carente, orari e turni stressanti a parere dei lavoratori. Inoltre si era rilevata anche la presenza di lavoratori con problemi fisici assegnati a mansioni non adeguate.

In generale se il problema non è legato all'ambiente termico può essere rilevato dall'indagine preliminare sui luoghi di lavoro e sui lavoratori; in particolare i segnali più frequenti in questo senso sono risposte vaghe o addirittura contrastanti nell'individuazione dei problemi e delle postazioni critiche (per alcuni fa freddo per altri fa caldo, per alcuni manca l'aria, ecc.).

Un caso analogo è stato rilevato anche in un call center, ovvero ambiente termico accettabile ($PMV: 0 \div 0,7$) e rapporti conflittuali nella gestione del personale. Quello dei call center è un settore che in Piemonte coinvolge alcune migliaia di lavoratori, con una forte espansione in questi ultimi anni, in merito al quale sono opportune alcune osservazioni. Nella classificazione mostrata in figura 3 i call center sono inseriti nel gruppo “uffici” nell’ambito del quale hanno un’incidenza pari a circa il 22% per numero di indagini e pari al 38% per postazioni di misura. I risultati ottenuti, a parte il caso appena citato, mostrano una situazione di non facile gestione e con diversi problemi legati alle caratteristiche degli ambienti stessi. Si tratta quasi sempre di locali “open-space” medio-grandi ad elevata densità di lavoratori e strumentazione elettronica che comporta un carico termico aggiuntivo non trascurabile (Figura 7).

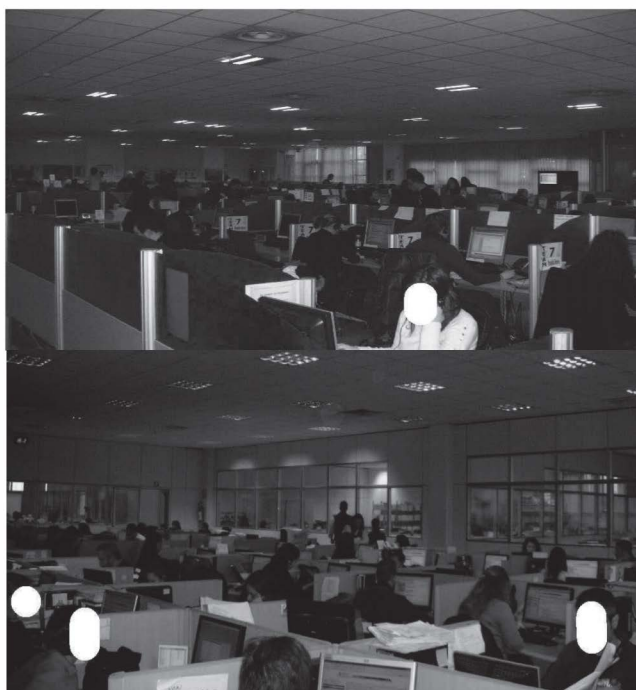


Figura 7

Queste caratteristiche congiuntamente a scarsa efficienza degli impianti di trattamento e ricambio d’aria, spesso installati in vecchi locali destinati in precedenza ad altre attività e riadattati per l’occasione, rendono estremamente difficoltoso garantire condizioni microclimatiche omogenee e accettabili. A volte anche la minima variazione delle condizioni ambientali esterne, ad esempio l’irraggiamento solare nell’arco della stessa giornata, influisce in modo marcato sul microclima indoor determinando condizioni di elevato discomfort.

In **Figura 8a** e **8b** sono riportati due esempi.

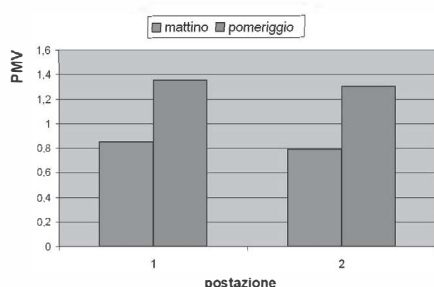


Figura 8a

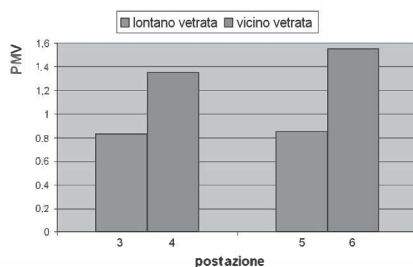


Figura 8b

La **Figura 8a** mostra la variazione in senso peggiorativo del PMV nelle stesse postazioni (1 - 2) in differenti momenti della giornata in periodo primaverile, rispettivamente a metà mattina (tra le 10 e le 11) e nel primo pomeriggio (tra le 14 e le 15). In **Figura 8b** invece si vede l'effetto sul PMV di una vetrata irraggiata dal sole su postazioni di un locale di ampia metratura, posizionate rispettivamente sul lato della parete vetrata (postazioni 4 e 6) e sul lato opposto in cui vi è una parete in muratura (postazioni 3 e 5); anche in questo caso la differenza tra i valori di PMV è rilevante.

La percentuale di postazioni di misura che hanno mostrato condizioni di discomfort termico globale molto elevato (si intende: $+1,5 \leq PMV \leq -1,5$) risulta pari al 25% del totale; l'incidenza dei diversi ambienti di lavoro su tale dato è mostrata in **Figura 9**.

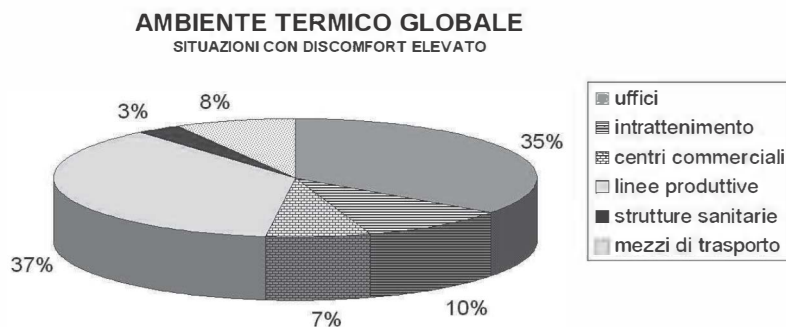


Figura 9

La maggior parte delle situazioni di discomfort si osservano, quasi equamente distribuite, tra le categorie “uffici” e “linee produttive”. Per quest’ultima categoria il dato può apparire prevedibile in quanto si tratta di ambienti di tipo industriale o artigianale. La gestione dell’ambiente termico potrebbe risultare più problematica in relazione a fattori molto variabili da un caso all’altro, ad esempio la struttura dell’edificio, l’ampiezza delle superfici, i cicli produttivi e i macchinari presenti, ecc. Inoltre molto spesso il microclima non è considerato un aspetto prioritario dal punto di vista igienistico in questo tipo di ambienti. Meno prevedibile o scontato appare invece il dato sugli uffici perché tendenzialmente assimilabili ad ambienti più

“semplici” nella gestione del microclima, sia dal punto di vista strutturale, impiantistico e del ciclo di lavoro presente, inteso come attività fisica o dispendio metabolico.

Infine i dati mostrati in **Figura 10** riguardano le postazioni ad elevato discomfort ($+1,5 \leq PMV \leq -1,5$) espresse come percentuale del numero totale di postazioni di misura in ogni categoria.

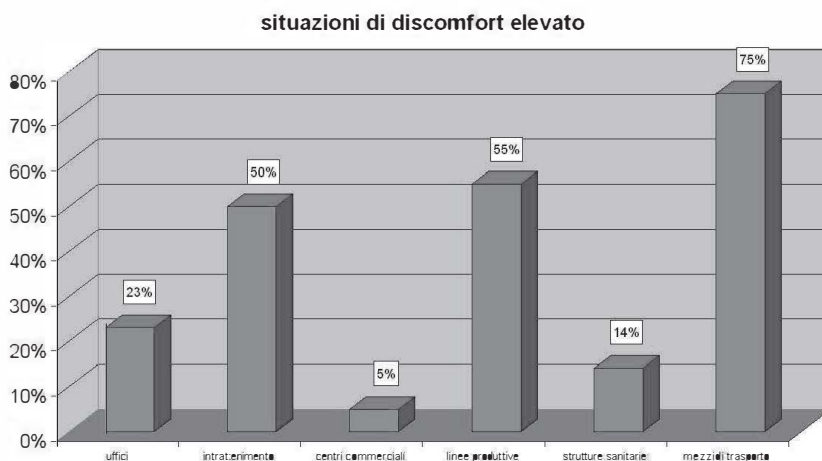


Figura 10

Le percentuali mostrate in figura 10 andrebbero correlate con i dati di **Figura 3** e **Figura 4**; in quest’ottica le percentuali mostrate assumono significatività, a prescindere dal loro valore assoluto, in relazione alla dimensione del campione a cui ogni gruppo si riferisce, in termini sia di numero di ambienti indagati che di postazioni di misura.

Le situazioni di discomfort riscontrate sono fondamentalmente riconducibili, direttamente o indirettamente, a due fattori: impianti di ricambio e/o trattamento dell’aria, organizzazione dei posti di lavoro e/o ciclo lavorativo. Nel caso di aree produttive di tipo industriale sono spesso emerse grossolane carenze dal punto di vista progettuale e organizzativo, ad esempio assenza di impianti di ricambio d’aria in tutti i casi esaminati e in molti di questi l’impossibilità di avere un ricambio naturale mediante aperture o finestre (presenza solo di ingresso principale, uscite di emergenza), elevata densità di macchinari in spazi ridotti e mal distribuiti sulla superficie, anche di ampia metratura; i problemi principali erano pertanto legati all’effetto serra provocato dalla struttura dell’ambiente di lavoro, temperature elevate e ristagno d’aria.

Nella seguente **Tabella 4** è riportato uno schema che mostra in sintesi le criticità riscontrate e gli ambiti di intervento migliorativo in relazione alla tipologia di ambiente di lavoro.

Negli uffici, sia “open space” che tradizionali, sono state rilevate molte postazioni con discomfort termico elevato.

Tabella 4

Tipologia di ambiente	Principali cause di disagio	Ambiti di intervento migliorativo
Centro commerciali.	Correnti d'aria. Gradienti di temperatura.	Organizzativo.
Strutture sanitarie.	Correnti d'aria.	Organizzativo.
Uffici – open space.	Temperature elevate. Sorgenti radianti. Ristagno d'aria. Bassa umidità.	Organizzativo e progettuale. Adeguamento e gestione impianti tecnologici.
Uffici tradizionali.	Temperature elevate o basse. Gradienti di temperatura.	Adeguamento e gestione impianti tecnologici. Installazione UTA.
Locali d'intrattenimento.	Ristagno d'aria. Temperature elevate.	Adeguamento e gestione impianti tecnologici.
Mezzi di trasporto.	Temperature elevate. Correnti d'aria. Gradienti di temperatura.	Progettuale. Installazione UTA.
Linee produttive.	Ristagno d'aria. Temperature elevate.	Organizzativo e progettuale. Adeguamento e gestione impianti tecnologici.

Un problema frequentemente riscontrato ha riguardato l'inadeguatezza dell'organizzazione e distribuzione delle postazione di lavoro, in relazione alla disposizione degli elementi dell'impianto di ricambio dell'aria. La gestione delle condizioni microclimatiche è risultata più problematica negli uffici di tipo "open space", in quanto condizionata da numerosi fattori. Scelte progettuali e organizzative oculte sulla concentrazione e disposizione delle postazioni di lavoro, della relativa strumentazione ed elementi di arredo sono indispensabili per il raggiungimento del comfort termico.

Uffici inseriti in edifici "sigillati", indipendentemente dalla tipologia, hanno spesso mostrato problemi di ricambio d'aria a causa dei limiti e inefficienze degli impianti tecnologici, non in grado di apportare l'adeguato volume d'aria di rinnovo nei locali. Nel caso dei mezzi di trasporto le indagini condotte su una serie di locomotori di vecchia fabbricazione, senza impianto di condizionamento dell'aria, hanno rivelato soprattutto durante la stagione estiva l'inadeguatezza delle cabine di guida fortemente influenzate dalle condizioni climatiche esterne. In alcuni locomotori gli impianti non previsti in fase di progettazione e installati successivamente su vecchie cabine, sono risultati essere un evidente "elemento invasivo", il cui inserimento vincolato da spazi ristretti non ha tenuto debitamente conto della posizione degli operatori, per questo si sono rivelati sempre causa di molti problemi quali elevate

correnti d'aria sul personale, gradienti termici e temperature in cabina fortemente disomogenee e non facilmente controllabili.

In qualsiasi tipologia di ambiente dove è richiesto un adeguato livello di qualità dell'ambiente termico, la progettazione e realizzazione degli impianti deve essere contemporanea a quella della struttura. Scelte corrette in fase progettuale e realizzativa sono il punto di partenza per l'ottenimento di un microclima soddisfacente.

5 - CONCLUSIONI

La valutazione termoigrometrica degli ambienti di lavoro moderati dipende da molti fattori, di tipo fisico che riguardano l'ambiente e di tipo personale relativi al lavoratore e alla sua attività, in più vi è un'ampia variabilità di tipologie di luoghi di lavoro dipendenti da caratteristiche geometriche e strutturali, dal compito per cui tali luoghi sono adibiti, dall'impiantistica di cui sono dotati, ecc.

Il contesto normativo a cui riferirsi nella realizzazione del processo valutativo è composto da consolidati standard tecnici che forniscono solidi strumenti oggettivi di analisi. L'ultima revisione che ha riguardato la norma di riferimento per la valutazione degli ambienti *moderati*, la UNI EN ISO 7730, ha senza dubbio approfondito e discusso con maggior dettaglio molti aspetti, in particolare per quanto riguarda i fattori di discomfort locale; ha introdotto inoltre una nuova classificazione nei criteri di accettabilità introducendo come abbiamo visto 3 nuove classi in sostituzione dell'unica precedentemente esistente. Quest'ultima novità presenta però almeno due debolezze ancora oggetto di dibattito tra gli addetti ai lavori: la prima riguarda il fatto che gli intervalli delle tre classi sono troppo ristretti in relazione all'ampiezza degli errori che possono essere commessi nel processo di valutazione, la seconda è che la norma non fornisce i criteri per l'inserimento degli ambienti nella classe opportuna. Si osserva che la classificazione deve essere un prerequisito ai fini della valutazione e deve pertanto essere effettuata a priori secondo strumenti oggettivi.

La valutazione dell'ambiente termico non deve essere semplicemente il risultato fornito dal calcolo degli indici descrittivi, in quanto nella percezione del comfort o disagio intervengono anche fattori soggettivi e psicologici, spesso condizionati da elementi esterni che nulla hanno a che vedere con i parametri microclimatici dell'ambiente lavorativo.

Il processo di valutazione dell'ambiente termico dovrebbe svilupparsi in due fasi. La prima esclusivamente di "osservazione" e "investigazione", finalizzata a raccogliere informazioni e documentazione sulle condizioni di lavoro, sugli impianti, sulla caratterizzazione della variabilità delle condizioni di lavoro in funzione della variabilità meteorologica a breve periodo (giornaliera) o a lungo periodo (stagionale) e infine sull'individuazione e definizione della consistenza dei problemi lamentati.

L'indagine inoltre dovrebbe prevedere il coinvolgimento non solo del tecnico/consulente ma di tutte le figure aziendali che a vario titolo si occupano di prevenzione e sicurezza, ovvero medico competente, lavoratori o loro rappresentanti, responsabile e addetti per la sicurezza da parte dell'azienda.

Nella prima fase non sono necessarie misure strumentali, in quanto essa è finalizzata ad identificare i problemi esistenti e la loro rilevanza, sulla base dei quali permettere agli organi preposti di decidere se sono già applicabili misure tecniche, organizzative, strutturali, ecc. tali da portare alla soluzione di quanto emerso oppure se si rendono necessari approfondimenti mediante misurazioni.

Nella fase successiva invece, sulla base delle informazioni raccolte durante l'indagine preliminare, si dovrebbe procedere alla definizione della strategia di monitoraggio: individuare le postazioni di misura per posizione e quantità, le condizioni ricorrenti a massimo disagio/rischio rappresentative durante le quali acquisire i parametri ambientali, stabilire la durata minima della misura, valutare se e quale ciclicità delle condizioni ambientali esterne (stagionale e/o giornaliera) correlare alla misura, ecc.

A fini prevenzionistici si osserva come siano di fondamentale importanza le fasi di progettazione e realizzazione dei luoghi di lavoro, tenendo debitamente conto dei requisiti microclimatici previsti. Se vengono rispettati questi criteri diventa più agevole gestire eventuali criticità che potrebbero comunque verificarsi successivamente, mentre è molto più problematico intervenire in situazioni già compromesse, nell'ambito delle quali gli aspetti microclimatici non sono mai stati considerati. Intervenire in queste condizioni spesso risulta poco efficace o peggio genera nuove problematiche.

Le modalità di intervento più efficace volte a migliorare l'ambiente termico in ambito lavorativo abbiamo visto essere di tipo strutturale e/o organizzativo. Le prime orientate a favore di installazione, miglioramento o adeguamento di impianti tecnologici, le seconde volte ad un utilizzo più razionale degli spazi lavorativi e del personale.

6 – BIBLIOGRAFIA

- [1] D.Lgs. n.81 del 9 aprile 2008. Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n.123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro. G.U. n.108/L del 30 aprile 2008 e s.m.i.
- [2] Norma UNI EN ISO 7726, "*Ergonomia degli ambienti termici – Strumenti per la misurazione delle grandezze fisiche*".
- [3] Norma UNI EN ISO 7730, "*Ergonomia degli ambienti termici – Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale*".
- [4] Norma UNI EN ISO 8996, "*Ergonomia dell'ambiente termico – Determinazione del metabolismo energetico*".
- [5] Norma UNI EN ISO 9920, "*Ergonomia dell'ambiente termico – Valutazione dell'isolamento termico e della resistenza evaporativa dell'abbigliamento*".
- [6] Coordinamento delle Regioni e delle Province Autonome + ISPESL, "*Linee Guida. Microclima, aerazione e illuminazione nei luoghi di lavoro. Requisiti standard. Indicazioni operative e progettuali*". 2006.
- [7] P.O. Fanger: "Thermal Comfort" McGraw-Hill – 1970.

- [8] F.R. D'Ambrosio Alfano, F. Liotti: *"La qualità degli ambienti confinati non industriali: il discomfort termoigrometrico"*. G. Ital. Med. Lav. Erg. 2004; 26:4.
- [9] G. Alfano, F.R. D'Ambrosio, L. Esposito: *"Valutazione della sensibilità dell'indice PMV alla variazione delle sue variabili indipendenti."* Atti del 55° Congresso Nazionale dell'ATI, 2000 – Matera.
- [10] M. Dell'Isola, A. Russi: *"Problematiche di misura del benessere e dello stress termico"*. Atti del Convegno Nazionale **"dba 2006 – Rischi fisici negli ambienti di lavoro – Microclima."** Modena 12 – 13 ottobre 2006.
- [11] M. del Gaudio, D. Freda, P. Lenzuni. *"La classificazione degli ambienti termici"*. Giornale degli Igienisti Industriali – vol. 34 – n. 2 – aprile 2009.
- [12] P.Tura, M.Fontana, G.Biamino: *"Ambiente termico moderato. Indagine strumentale e valutazione dell'ambiente microclimatico in alcune cabine di guida di locomotori"*. Atti del Convegno **"dba 2010 – Rischi Fisici: valutazione, prevenzione e bonifica nei luoghi di lavoro. A che punto siamo."** Modena 6 – 7 ottobre 2010.
- [13] D. Freda, M. del Gaudio, P. Lenzuni. *"La qualità dell'aria in ambienti antropizzati – descrittore e valori limite"*. Giornale Italiano di Igiene Industriale e Ambientale – vol. 1 – n. 1 – gennaio 2010.
- [14] ASHRAE 62. *"Ventilation for acceptable indoor air quality"*.

LA STRUMENTAZIONE DI MISURA PER LE RADIAZIONI NON IONIZZANTI

Francesco Frigerio

Fondazione Salvatore Maugeri Centro di Ricerche Ambientali, Pavia

RIASSUNTO

Lo scopo di questo lavoro è illustrare la strumentazione per l'esecuzione delle misure che sono normalmente necessarie per la valutazione dei rischi da radiazioni non ionizzanti.

Alle frequenze < 100 kHz, è importante, poter valutare il contenuto spettrale compresa, in qualche caso, la forma dell'impulso. Per radiofrequenza e microonde, viceversa, le misure spettrali sono di solito richieste solo per accertamenti di tipo specialistico. Per le radiazioni ottiche incoerenti, l'analisi spettrale è sostituibile con misure eseguite con sensori pesati sullo spettro che, anche se meno flessibili, in alcuni intervalli spettrali possono garantire una maggiore accuratezza. Per la valutazione del rischio laser le misure sono richieste in casi specifici e per approfondire particolari aspetti della valutazione.

1-INTRODUZIONE

Una puntuale discussione dell'interazione radiazione-materia va oltre le possibilità di questo spazio e probabilmente anche dell'autore, tuttavia qualche concetto deve essere richiamato in quanto è dalle leggi fisiche, prima che dai decreti legislativi, che dipendono le tecniche di misura.

Vale quindi la pena richiamare che si parla di campo "elettromagnetico" perché, come formalizzato da Maxwell, una variazione temporale del campo elettrico genera un campo magnetico e viceversa:

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (1)$$

Già il formalismo non elementare dell'equazione (1), che è solo una delle equazioni di Maxwell in forma differenziale, ci ricorda che la prima strumentazione necessaria per la misura delle radiazioni non ionizzanti è di tipo intellettuale, comporta un costo non basso e richiede una certa esperienza anche per "scaricarla" dalla rete: non tutte le informazioni reperibili in internet sono affidabili, in particolare in questo campo.

Nel riferimento [1] è riportato un esempio dei contenuti “minimi” che è necessario saper maneggiare per operare in questo settore.

Nella **Figura 1** è riportata una classica rappresentazione di un'onda elettromagnetica che si propaga nello spazio con la velocità che nel vuoto rappresenta la costante universale c .

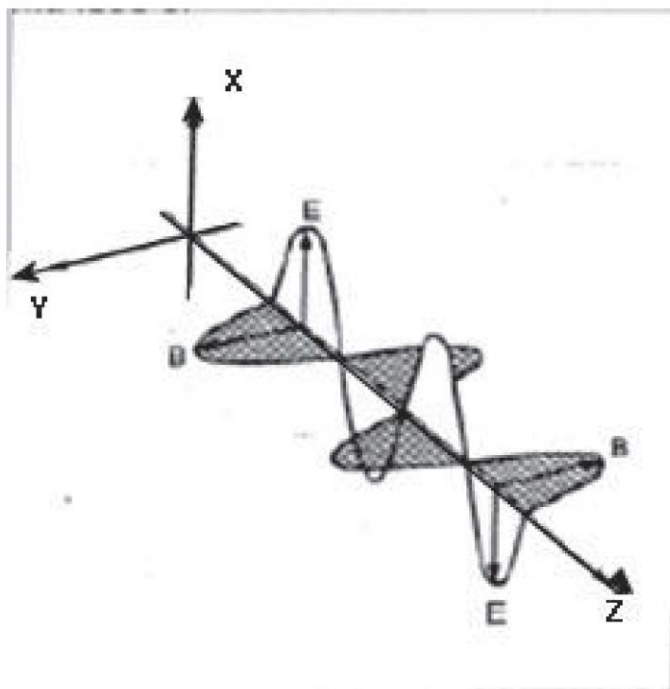


Figura 1: propagazione nello spazio del campo elettromagnetico

A diversi intervalli di frequenza ν o lunghezza d'onda λ , fra le due vale la relazione

$$\lambda \nu = c \quad (2)$$

si verificano fenomeni apparentemente molto diversi tra loro come illustrato in **Figura 2**.

Nel seguito discuteremo le diverse modalità di interazione e gli strumenti per la valutazione degli effetti in ordine crescente di frequenza.

Per ragioni di opportunità, non verranno illustrate caratteristiche tecniche e prestazioni di strumenti specifici, queste informazioni d'altra parte possono essere reperibili presso i fornitori della strumentazione.

L'ambizione di questo lavoro piuttosto, è quella di fornire una prima serie di indicazioni sulle caratteristiche minime in termini di prestazioni che devono essere richieste ai rappresentanti dei fornitori per essere in grado di eseguire le misure richieste per le valutazioni di rischio in ambiente di lavoro. Se un fornitore non è in grado di fornire risposte chiare ai quesiti posti correttamente, si può già legittimamente avere qualche dubbio sull'opportunità dell'acquisto.

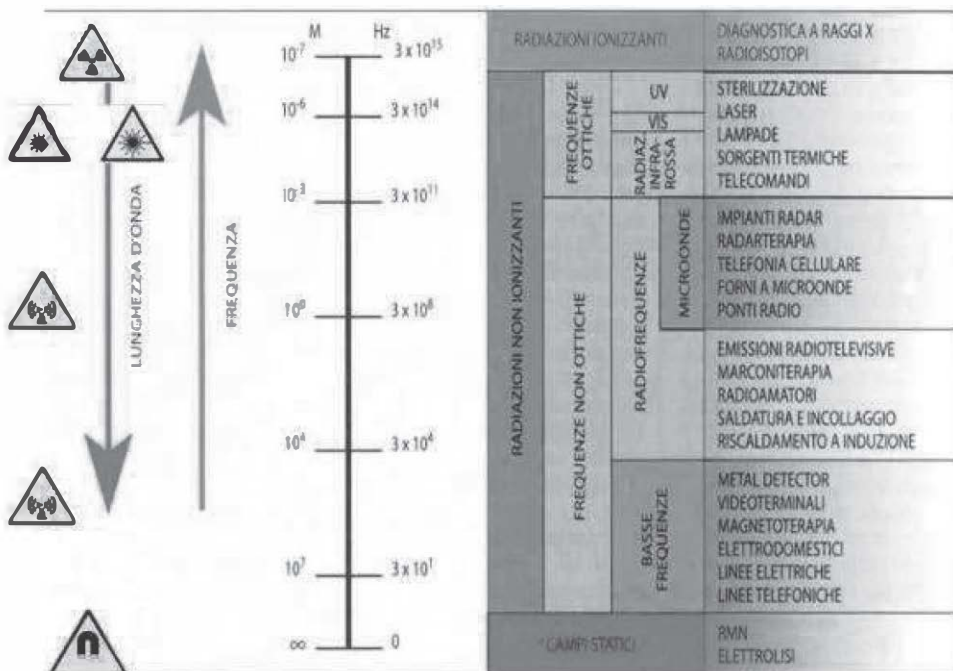


Figura 2: spettro delle radiazioni elettromagnetiche

2-INTERAZIONE RADIAZIONE-MATERIA

A frequenza < 100 kHz, le correnti e i campi indotti, agiscono indipendentemente; in particolare il campo elettrico viene “messo a terra” dalle strutture conduttive mentre il campo magnetico produce all’interno dei tessuti densità di corrente dipendenti dalle proprietà dielettriche degli stessi:

La densità delle correnti indotte all’interno dei tessuti, espressa in A/m^2 è data da

$$\vec{J} = \sigma \times \vec{E} \quad (3)$$

dove il campo elettrico è interno al corpo umano e σ rappresenta le proprietà dielettriche dei tessuti. Poiché il danno è correlato a grandezze che non sono direttamente misurabili, l’International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) definisce quindi dei valori di riferimento per il campo elettrico E esterno al corpo umano, il campo di induzione magnetica B etc; il cui rispetto garantisce di non superare i limiti di base fissati in termini di J o di E interno.

Le proprietà matematiche delle onde, ci ricordano che più la forma d’onda è diversa dalla sinusoidale, più componenti spettrali agiscono sul tessuto; alle frequenze più basse, le diverse componenti non agiscono contemporaneamente (somma coerente delle armoniche) ma ognuna con la sua differenza di fase.

Gli standard internazionali [2],[3] stabiliscono le procedure per tenere conto degli effetti della sovrapposizione di campi a frequenza diversa, mediante un “indice del

picco ponderato" che è quanto di più simile ad una misura pesata in frequenza è possibile ottenere in questo intervallo spettrale.

Tra 10 MHz e 300 GHz, nella maggior parte delle situazioni, il "bersaglio" si trova, rispetto alle sorgenti, nella zona di campo lontano, dove campo elettrico e campo magnetico si ottengono uno dall'altro e sono "in fase", esattamente come rappresentato in **Figura 1**.

In queste condizioni è possibile, con buona approssimazione, considerare la somma coerente delle armoniche: il valore di azione è quindi rispettato se vale la condizione

$$\sum_{f=100\text{kHz}}^{f=300\text{GHz}} \left(\frac{E_f}{E_{LA,f}} \right)^2 \leq 1 \quad (4)$$

dove E_{LA} è il livello di azione per il campo elettrico alla frequenza f .

Nell'intervallo tra 100 kHz e 10 MHz devono essere considerati sia gli effetti delle correnti indotte, sia gli effetti termici; stabilire quale è il criterio più cautelativo è tutt'altro che semplice; ai fini delle misure bisogna anche ricordare che gli effetti delle correnti indotte sono supposti istantanei mentre quelli termici dipendono dalla media su 6 minuti.

In questo particolare intervallo, tra l'altro, sono importanti sia il campo magnetico sia il campo elettrico, ed essendo spesso i bersagli a distanza dalla sorgente confrontabile con la lunghezza d'onda devono essere misurati entrambi indipendentemente.

Una delle numerose nozioni che sfuggono al pubblico è che il campo elettromagnetico penetra nei tessuti a profondità tanto minore quanto maggiore è la frequenza.

Per questo, la Direttiva 2013/35/UE prevede alle frequenze comprese tra 6 e 300 GHz un intervallo di media temporale funzione della frequenza e, soprattutto, fissa un Valore Limite di Esposizione, non un semplice livello di azione, alla densità di potenza di 50 W/m^2 .

Questo valore è finalizzato a limitare l'energia elettromagnetica che può incidere sul corpo umano, con uno spettro che normalmente è composto da una frequenza principale e un certo numero di armoniche a intensità decrescente man mano che ci si allontana dalla fondamentale.

La densità di energia sopra ricordata può essere misurata per via termica o, più spesso, come funzione del campo elettrico: nella regione di campo lontano, il campo magnetico è in relazione fissa con il campo elettrico per cui la densità di potenza, indicata normalmente con S , è semplicemente:

$$S = \frac{E^2}{377} \quad (5)$$

A frequenze $>300 \text{ GHz}$, corrispondono lunghezze d'onda $< 1 \text{ mm}$, il campo elettromagnetico si ferma in effetti nei primi millimetri di profondità del tessuto bersaglio.

Frequenze così elevate non sono più prodotte da sistemi elettronici ma da atomi, molecole o cristalli allo stato eccitato che liberano parte dell'energia mediante salti quantici tra livelli energetici diversi.

In generale, il numero di oscillatori (per esempio gli atomi di un metallo) in un certo intervallo di energia, dipende dalla temperatura del corpo riscaldato, ma in ciascun intervallo di energia può esserci un'emissione significativa. Il risultato è che un corpo portato ad una certa temperatura emette energia elettromagnetica con uno spettro che è funzione della temperatura (legge del corpo nero) ma che si estende in un ampio intervallo di lunghezze d'onda.

Molte sorgenti luminose, a cominciare dalle lampadine alogene dei fari delle automobili, sono per la fisica, "corpi neri"!

L'interazione della radiazione con la materia dipende in questo intervallo, più che dalla frequenza, dal rapporto fra la lunghezza d'onda e la dimensione degli ostacoli incontrati. Il corpo umano poi, è dotato di un apparato visivo evoluto per discriminare le lunghezze d'onda comprese nell'intervallo tra 380 e 780 nm, alle quali corrispondono i colori dal violetto al rosso ma che può subire effetti negativi in caso di sovraesposizione anche in un intervallo molto più ampio. Siamo quindi nel dominio delle radiazioni ottiche, del quale la parte visibile dello spettro è solo un sottoinsieme.

La quantità fisica con cui confrontarsi è sempre la densità di energia ma tenendo conto che lunghezze d'onda diverse di pochi nm possono avere effetti molto diversi.

Nell'infrarosso estremo, gli effetti sono di tipo termico e si manifestano per densità di energia non troppo diverse da quelle ritenute pericolose per l'esposizione a microonde.

A titolo di esempio, il limite di esposizione per la protezione della superficie dell'occhio (cornea e cristallino) dalla radiazione infrarossa è di 100 W/m², da confrontarsi con i 50 W/m² fissati per le microonde tra 6 e 300 GHz.

La valutazione del rischio di esposizione a radiazione ottica incoerente comporta, in generale, la valutazione di una funzione, definita spettro efficace o irradianza spettrale, del tipo:

$$E_{eff} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} w(\lambda) \times E(\lambda) \times d(\lambda) \quad (6)$$

Per ciascuno dei diversi rischi, sia oculari, sia cutanei, si applica uno specifico intervallo λ_1 - λ_2 e una specifica funzione di pesatura o spettro di azione $w(\lambda)$.

Il risultato dell'espressione (6) ha ancora le dimensioni di una densità di potenza, espressa in W/m².

In alcuni casi, per esempio il rischio di ustione corneale citato prima, $w(\lambda)$ può essere identicamente = 1.

Quando la radiazione può arrivare sulla retina, lo spettro efficace deve essere valutato tenendo conto delle condizioni nelle quali il cristallino genera la più piccola immagine retinica; a questo fine il Valore Limite di Esposizione (VLE) è espresso in termini di radianza, ovvero il flusso di energia emesso per unità di angolo solido:

Sotto certe condizioni, la radianza è il rapporto fra l'irradianza e l'angolo solido sotto il quale la sorgente di area A viene vista dal bersaglio collocato a distanza r ,

questo a sua volta può essere ricavato dal rapporto fra l'area della sorgente e la distanza, vale quindi la relazione:

$$L = \frac{E \cdot r^2}{A} \quad (7)$$

La radianza non dipende quindi dalla distanza ma da quanto la sorgente è puntiforme.

Valutazioni della radianza, con diverse curve di pesatura sono richieste nell'intervallo tra 300 e 1400 nm, anche se l'intervallo visibile è limitato tra 400 e 700 nm. Nel vicino infrarosso, tra 700 e 1400 è richiesta una particolare cautela in quanto la radiazione viene amplificata dal cristallino sulla retina ma senza che si produca uno stimolo significativo per attivare una reazione di difesa.

Quando il danno non interessa la retina, i VLE sono invece espressi in irradianza o in Esposizione Radiante, ovvero la densità di energia assorbita, di solito nel turno di lavoro, espressa in J/m².

In questo caso, dividendo il VLE in J/m² per l'irradianza in W/m² si ottiene il tempo di esposizione massimo, espresso in secondi, che garantisce il rispetto del VLE stesso.

La radiazione ottica coerente (laser) ha le stesse caratteristiche di pericolosità della radiazione incoerente in funzione della lunghezza d'onda, accentuate dalle proprietà di collimazione dei fasci che portano a raggiungere valori di radianza elevatissimi, sia pure in direzioni ben definite (angoli solidi molto piccoli).

I dispositivi laser possono produrre impulsi ripetuti di durata molto breve che possono essere sfruttati in molte applicazioni: per esposizioni brevi, il calore è depositato in un tempo inferiore al tempo necessario per allontanare il calore dalla zona irradiata.

Dal punto di vista del rischio gli impulsi ultracorti introducono rischi aggiuntivi che si ritrovano solo in questi tipi di laser: microcavitazione (formazione ed esplosione di bolle), propagazione di onde di shock sono due esempi di effetti possibili dei laser con impulsi < 1 µs; al momento sono già commercializzati, per applicazioni mediche e altro, laser con impulsi al femtosecondo, 1*10⁻¹⁵ s.

3-STRUMENTAZIONE E APPLICAZIONI

Vediamo quindi, partendo dalla discussione precedente e in considerazione delle più diffuse sorgenti, quali caratteristiche deve avere la strumentazione.

In fondo alla **Figura 1** troviamo un caso particolare di campo magnetico a bassa frequenza che sono i campi magnetici statici.

Il campo elettrico statico non è praticamente di interesse in quanto i dispositivi, tipicamente gli elettrofiltri, che impiegano campi elettrici ad elevato potenziale sono protetti per evitare rischi di elettrocuzione prima che altri eventuali effetti che nessuno è ancora riuscito a sperimentare.

Viceversa il campo magnetico statico può costituire un rischio, in particolare per i dispositivi elettronici.

La strumentazione disponibile sul mercato è stata sviluppata per i fisici che si occupano di risonanza magnetica e, da anni, hanno l'obbligo di accertare il percorso

della linea di isocampo a 0,5 mT, che la Direttiva 2013/35/EU fissa come livello di azione per i portatori appunto di dispositivi medici impiantati.

Nella pratica degli ambienti di lavoro bisogna prestare attenzione al fatto che molti dispositivi dichiarati “a corrente continua” funzionano in effetti con una corrente alternata in qualche modo “raddrizzata”, questa corrente può essere considerata continua ai fini pratici degli azionamenti che alimenta ma può generare componenti a diverse frequenze che potrebbero essere di interesse ai fini protezionistici.

Nella **Figura 3** si vede come il campo magnetico generato da un motore “a corrente continua” è (anche per effetto della rotazione) ben lontano dall'essere continuo, con diverse componenti in frequenza.

Nella parte inferiore della figura, lo spettro è confrontato con i valori di azione applicabili, secondo ICNIRP, ai lavoratori e alla popolazione.

Il fatto che tutte le componenti spettrali risultano inferiori ai livelli di azione per la popolazione non implica affatto che tali livelli sono rispettati: l'analisi con il metodo del picco ponderato evidenzia che il livello di azione per la popolazione è superato mentre quello per i lavoratori è rispettato; questa analisi deve essere condotta studiando il picco del segnale pesato nel dominio del tempo.

Per eseguire correttamente la misura è necessario uno strumento in grado di misurare con la corretta banda passante tre componenti ortogonali del campo magnetico e fornire l'indice del picco ponderato rispetto ai corretti valori di azione.

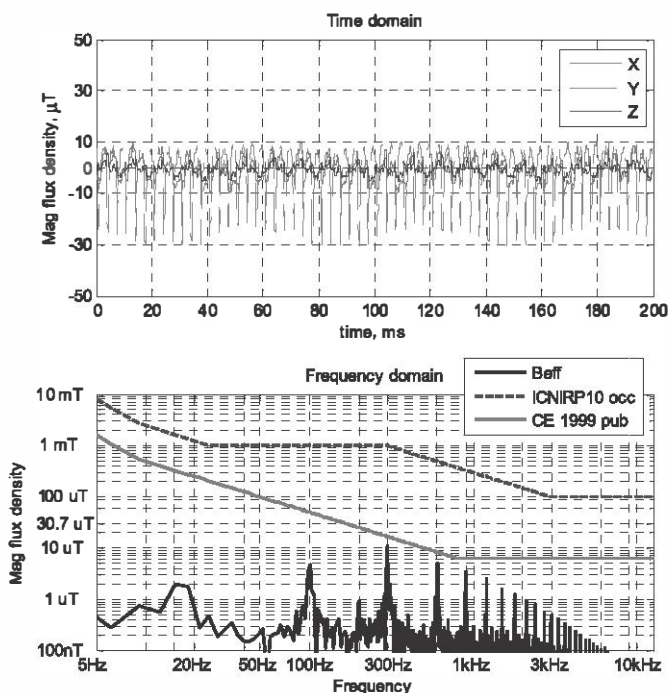


Figura 3: analisi del campo magnetico generato da un motore a corrente continua

Nell'esempio della Figura 4, lo strumento è dotato della corretta curva di ponderazione rispetto ai valori di riferimento per la popolazione (ICNIRP 1998) [4] ma non rispetto a quelli per i lavoratori (ICNIRP 2010) [3].



Figura 4: misura dei campi elettromagnetici a bassa frequenza e registrazione dei segnali con oscilloscopio a memoria digitale

Considerata l'evoluzione della normativa, questa eventualità è sempre possibile, per questo, e in generale per tutti gli strumenti di misura, è opportuno avere la possibilità di registrare direttamente i segnali analogici ed elaborarli successivamente mediante un oscilloscopio a memoria digitale (DSO).

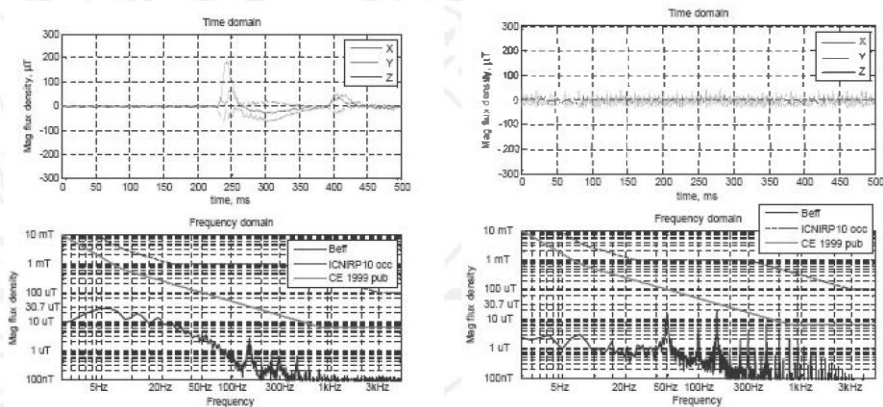
Si ricorda che questo tipo di strumento, che può essere utile anche per altri tipi di misura, ha di solito anche la possibilità di eseguire l'analisi spettrale con la tecnica matematica detta della Trasformata di Fourier Finita (FFT).

Rimandando ai testi specialistici per i dettagli, si ricorda che l'analisi spettrale basata su banchi di filtri (alle frequenze più basse) o su tecniche numeriche è tanto più affidabile quanto più i segnali hanno un contenuto spettrale stabile nel tempo, se lo spettro cambia velocemente, come nel caso degli impulsi, è preferibile studiare il segnale nel dominio del tempo.

Una introduzione a queste problematiche utile per studiare i segnali a bassa frequenza si trova nei riferimenti [1] e [2].

Un altro aspetto da tenere presente è che molte sorgenti industriali, compresa la saldatura illustrata in Figura 4, hanno uno spettro relativamente complicato e a priori non noto. Alle frequenze < 100 kHz, tra l'altro, essendo gli effetti legati alle correnti indotte supposti istantanei, è importante poter registrare l'evento più intenso il che si ottiene con un responsabile utilizzo della funzione "max hold" negli strumenti e/o con la memoria digitale dell'oscilloscopio come mostrato in Figura 5,

dove sono confrontati il primo innesco dell'arco e quello che si registra durante il mantenimento dell'arco.



1° impulso

durante la saldatura

Figura 5: confronto fra primo impulso di saldatura e mantenimento dell'arco durante il processo

In campo sanitario, l'analisi delle possibili forme degli impulsi come sopra descritto, è comunque indispensabile nella valutazione del rischio di esposizione nell'impiego della Stimolazione Magnetica Transcranica (TMS).

Nella **Figura 6** è invece mostrato lo spettro in frequenza generato da un apparecchio per fisioterapia (TECAR) che utilizza lo stesso tipo di generatore degli elettrobisturi. In questo caso, le frequenze ricadono in quella regione intermedia nella quale sono richieste sia la misura del campo elettrico sia quella del campo magnetico, lo spettro è tuttavia facilmente misurabile dall'elettronica dello strumento di misura e presenta praticamente solo componenti armoniche.

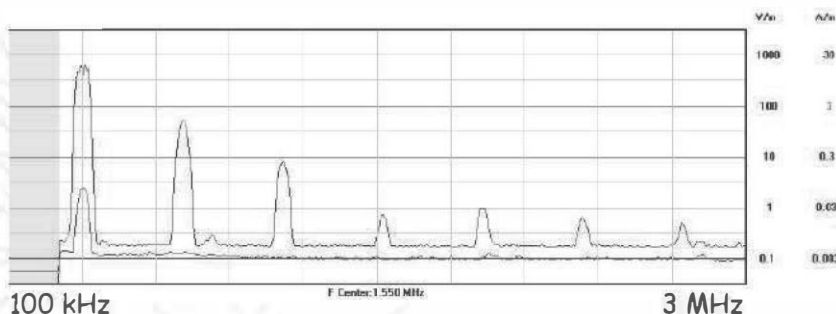


Figura 6: misura dello spettro a frequenze intermedie generato da un apparecchio per TECAR terapia (R.Di Liberto, VIII Congresso AIFM, Torino 2013)

Alle frequenze > 10 MHz, le sorgenti sono costituite praticamente solo da sistemi progettati per generare campi elettromagnetici, siano essi sistemi di trasmissione o altre apparecchiature come i forni a microonde.

In entrambi questi casi, la frequenza è un parametro assegnato, la necessità di distinguere le varie frequenze nasce solo quando non sono note a priori le caratteristiche di una certa trasmittente o è necessario distinguere il contributo di un trasmettitore rispetto ad un altro come tipico delle misure ambientali.

In questo caso è spesso adeguata la misura a banda larga che permette di stabilire il contributo complessivo di tutte le sorgenti che ricadono in un intervallo relativamente ampio di frequenze.

Gli strumenti a banda larga hanno comunque una sensibilità che varia con la frequenza ma questa variazione non è così significativa almeno in un certo intervallo utile.

Nella Figura 7 è riportata la sensibilità di un tipico strumento a banda larga per la misura del campo elettrico, si osserva che in un intervallo abbastanza ampio di frequenze la correzione da apportare alla lettura dello strumento varia tra 0,8 e 1,2. Si potrebbe a questo punto essere tentati di estrapolare la calibrazione anche al di fuori della banda certificata. Questa operazione è molto delicata e attuabile solo se si ha la certezza che una ristretta banda di frequenze sia prevalente sulle altre.

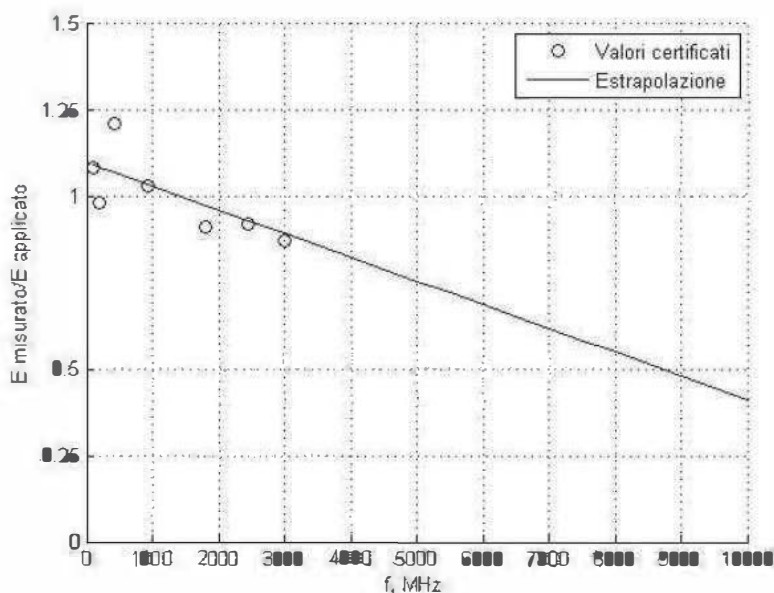


Figura 7: sensibilità di uno strumento a banda larga per la misura del campo elettrico a radiofrequenza

Le misure a banda stretta, a queste frequenze non possono essere eseguite con filtri analogici o mediante tecniche di FFT.

Gli analizzatori, che funzionano in modo molto simile ai radio ricevitori, richiedono la scelta di una frequenza centrale, di un intervallo di scansione (span) all'interno del quale eseguire una scansione sequenziale a bande di ampiezza prefissata (RBW), e di un tempo di acquisizione.

Una scelta non corretta dei valori di span e RBW può portare a clamorosi errori di misura, in particolare per segnali fortemente variabili nel tempo.

La stessa capacità di calcolare il valore di una grandezza utile, campo elettrico, campo magnetico o densità di potenza, è una prestazione particolare che comporta un costo aggiuntivo, in quanto è necessario tenere conto dell'efficienza dell'antenna nel rilevare un segnale di una determinata frequenza.

Nella Figura 8, sono riportati gli spettri misurati all'esterno e all'interno di un edificio servito da rete Wi-Fi.

I segnali alle varie frequenze sono semplicemente comparati in intensità, l'ordinata del grafico essendo espressa in dB su milliwatt (dBm).

La potenza misurata in mW dallo strumento è data semplicemente da:

$$P = 10^{dBm/10} \quad (8)$$

Conoscendo i fattori d'antenna alle diverse frequenze è possibile ricavare il contributo del campo a ciascuna frequenza. Come si vede, le misure spettrali sono delicate e richiedono una certa esperienza.

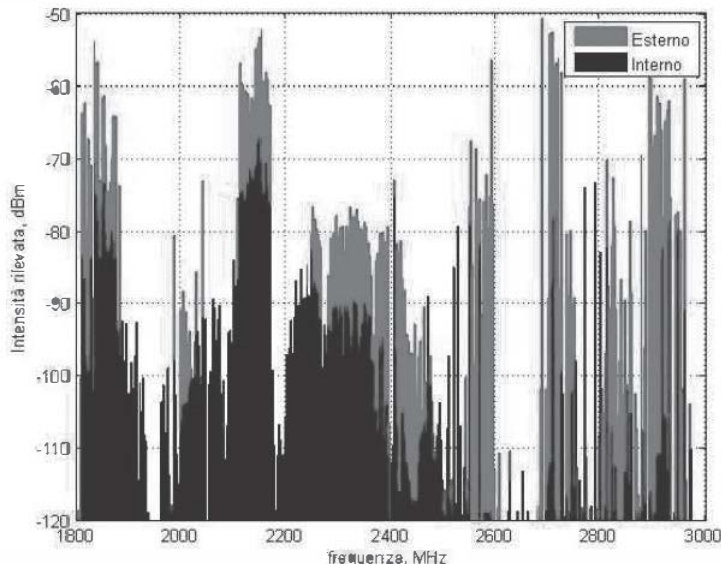


Figura 8: spettri misurati in presenza di segnali di telefonia mobile e reti Wi-Fi

Ai fini della valutazione dei rischi per i lavoratori, l'informazione fornita dallo strumento a banda larga, "campo elettrico < 0,5 V/m" è più che sufficiente; misure spettrali per individuare a quale frequenza, ovvero quale trasmettente è responsabile

del superamento del valore limite, sono invece spesso necessarie in riferimento alla normativa ambientale.

In casi particolari ma significativi, come l'esposizione ai campi generati dai sistemi radar, l'analizzatore di spettro diventa indispensabile, in quanto il campo è costituito da impulsi emessi in un cono relativamente stretto in rotazione periodica. Per eseguire un'analisi accurata sono necessarie diverse acquisizioni, con differenti tempi di acquisizione, span e RBW, per determinare frequenza di lavoro, frequenza di ripetizione degli impulsi, intensità etc.

Un cenno particolare in questa sede merita la questione della diagnostica a Risonanza Magnetica (RM), che ha avuto un ruolo significativo nell'evoluzione stessa della normativa sui campi elettromagnetici.

Ai fini della sicurezza del personale nella normale diagnostica clinica, la determinazione delle linee di isocampo statico è sicuramente la misura fondamentale richiesta. Se invece si vuole studiare l'esposizione del paziente o di altre persone presenti in particolari pratiche come l'assistenza ai pazienti pediatrici o l'impiego interventistico, è necessario mettere in campo tutte le tecniche di misura più sofisticate fin qui descritte.

Gli effetti dei gradienti di campo magnetico devono essere studiati con il metodo del picco ponderato [5]; la Figura 9 evidenzia come l'esposizione a campo a radiofrequenza essendo dovuta, per una macchina da 3T ad impulsi a 127 MHz, deve essere valutata con le stesse tecniche utilizzate per i radar [6].

Passando dal dominio delle microonde a quello dei raggi infrarossi, nella nostra discussione, bisogna notare che, ai fini pratici, non esistono sorgenti incoerenti significative.

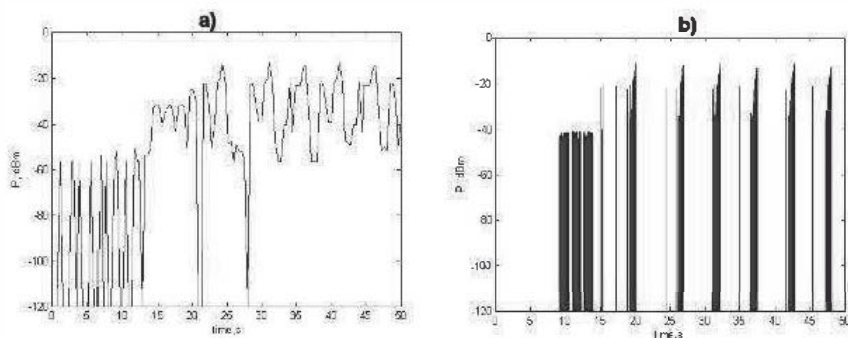


Figura 9: campo elettrico a 127 MHz misurato durante l'acquisizione dell'immagine di una RM da 3T, misurato con uno strumento a banda larga a) e con un analizzatore di spettro in modalità "span zero", b)

La teoria ci dice che un corpo che emette con la legge del corpo nero produce radiazione anche nell'intervallo fra 3 μm e 1 mm, in pratica tuttavia, la frazione di energia in questo intervallo non è normalmente considerata significativa.

Un'eccezione rilevante, ma nel campo delle sorgenti coerenti, è costituita dal laser a CO_2 che emette alla lunghezza d'onda di 10,6 μm .

Significativamente, il VLE per l'occhio a questa lunghezza d'onda è uguale a quello per la pelle ed essendo spesso le potenze in gioco dell'ordine dei kW, la misura, almeno del fascio diretto non è la prima priorità.

A parte questo, la valutazione del danno da radiazione IR alla superficie dell'occhio e della pelle richiede l'integrazione dello spettro da 780 fino a 3000 nm senza ponderazione; la valutazione del danno retinico termico richiede il calcolo su uno specifico spettro d'azione da 380 a 1400 nm. Sarebbe pertanto necessario l'utilizzo di uno spettroradiometro, il problema è che i modelli di maggiore diffusione e più facile impiego in campo, sono basati su rivelatori sensibili tra 200 e 1100 nm circa.

Le alternative a questo punto sono:

- a) misura con spettroradiometro fino a 1100 nm e misura con radiometro a risposta lineare fino a 3000 nm;
- b) misura con radiometro a risposta pesata in lunghezza d'onda;
- c) misura con spettroradiometro fino a 1100 nm e estrapolazione dello spettro con una curva di corpo nero [7].

In tutti i casi bisogna avere una completa conoscenza delle prestazioni degli strumenti; la stessa possibilità di impiegare sul campo lo spettroradiometro, non è sempre scontata.

L'approssimazione con lo spettro di corpo nero è adeguata per un certo numero di situazioni pratiche, come quella della Figura 10 dove la sorgente è protetta da uno schermo trasparente con una buona attenuazione anche nell'IR.



Figura 10: pezzo riscaldato per la forgiatura visto dall'interno dell'officina e dalla cabina di controllo

Nella Figura 10 b) il pezzo incandescente appare molto più luminoso dell'ambiente circostante mentre nell'immagine a) presa all'interno della cabina schermata si vedono altri elementi dell'ambiente. Ciò è dovuto al fatto che le normali fotocamere digitali che equipaggiano i telefoni cellulari hanno una sensibilità a 900 nm che è non nulla ma circa 1/5 rispetto a quella nel visibile, come mostrato in Figura 11. La fotocamera permette di rivelare lunghezze d'onda invisibili a occhio nudo.

Questa proprietà può essere utilmente sfruttata per diverse applicazioni, sia per radiazioni incoerenti sia per sorgenti laser.

Tornando alle sorgenti incoerenti, quando lo spettro di corpo nero è applicabile e non ci sono schermi frapposti, o meglio, in generale quando lo spettro è noto, da una

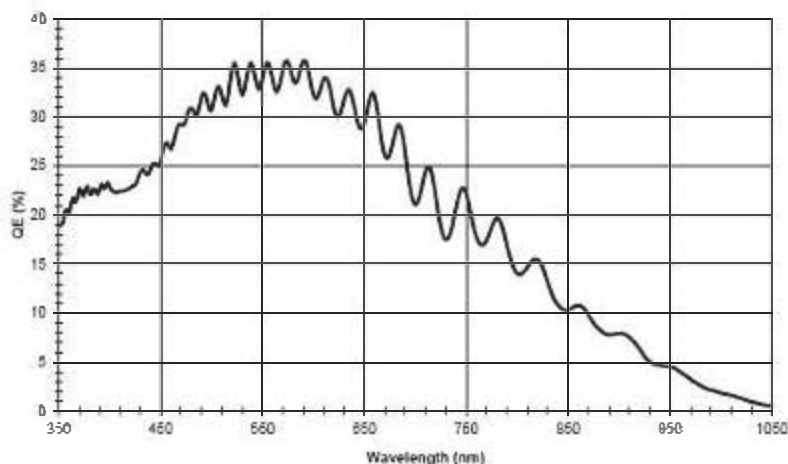


Figura 11: sensibilità dei rivelatori tipici delle fotocamere che equipaggiano i telefoni cellulari

misura in una regione dello spettro eseguita con uno strumento di risposta spettrale nota, è possibile dedurre tutti gli integrali necessari utilizzando l'espressione:

$$\frac{E_{\lambda_1-\lambda_2}(r)}{E_{\text{max } \lambda_1-\lambda_2}(r)} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\lambda' w(\lambda') M_s(\lambda')}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\lambda' s(\lambda') M_s(\lambda')} \quad (9)$$

dove $\lambda_1-\lambda_2$ è l'intervallo di sensibilità del rivelatore e $\lambda_1-\lambda_2$, l'intervallo nel quale interessa conoscere l'irradianza integrata, eventualmente pesata con la funzione $w(\lambda)$.

La tecnica è stata verificata utilizzando un misuratore di potenza per laser, che ha una risposta spettrale piatta tra 200 e 6000 nm, per misurare l'esposizione a radiazione infrarossa nei cementifici [8] ma può essere generalizzata.

Per la misura di sorgenti nell'UV-visibile, gli spettroradiometri sono strumenti molto flessibili che possono fornire informazioni interessanti, anche in questo caso bisogna tutta via avere consapevolezza dei limiti del sistema.

Questi strumenti registrano, per ciascuna banda di lunghezza d'onda, un segnale che si può esprimere come numero di conteggi diviso per il tempo di acquisizione.

Il software dello strumento o un altro sistema in post-elaborazione deve poi estrarre, banda per banda, il numero di conteggi rilevabile nello stesso tempo di acquisizione a sorgente spenta e moltiplicare per la sensibilità dello strumento. Quest'ultima è una funzione della lunghezza d'onda avente tipicamente l'andamento illustrato nella Figura 12 che rappresenta l'energia necessaria per registrare un segnale ad una data lunghezza d'onda.

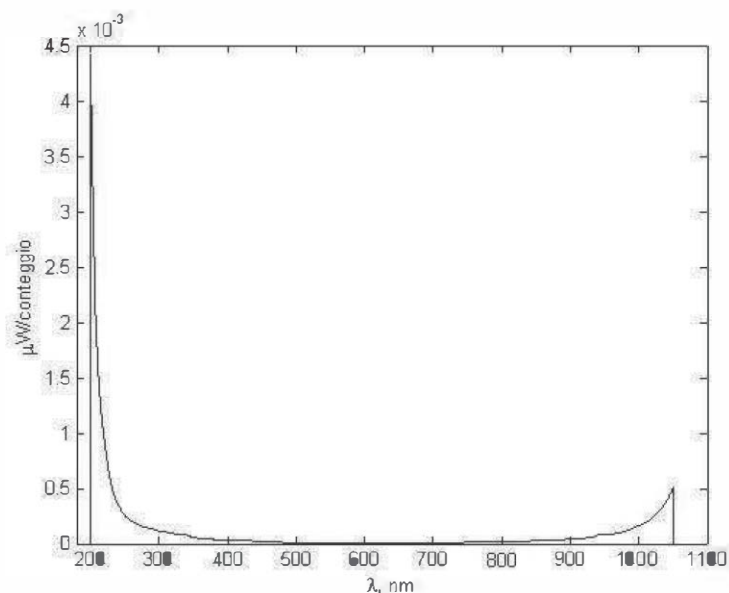


Figura 12: sensibilità di un tipico spettroradiometro a stato solido

Nell'UV questa energia è molto più alta rispetto al visibile e anche rispetto all'infrarosso. Questo significa che nell'UV il rivelatore è meno sensibile, e per ottenere un segnale superiore al fondo è necessario aumentare il tempo di acquisizione, inoltre il rapporto segnale/rumore alle lunghezze d'onda < 300 nm è normalmente peggiore rispetto all'UV-visibile.

Nella **Figura 13** sono confrontate le irradianze spettrali della radiazione emessa da una lampada di Wood per controlli non distruttivi e della radiazione riflessa dal pezzo.

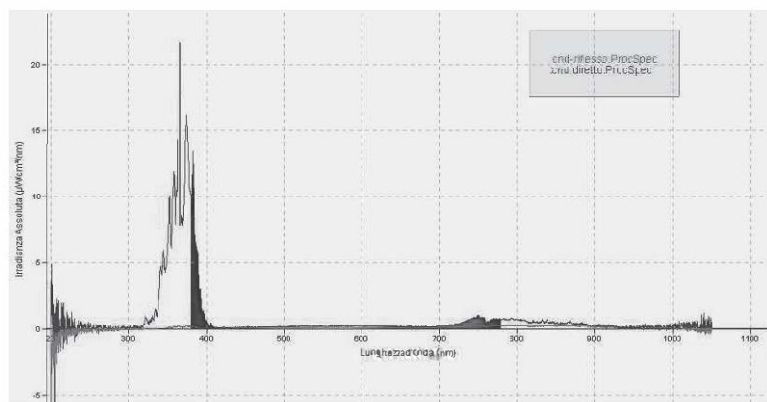


Figura 13: irradianza spettrale generata da una lampada di Wood, l'integrale del rumore nella regione dell'UV estremo può portare a sovrastimare questo rischio

L'integrale dell'irradianza pesata per il rischio fotochimico UV può superare il VLE anche solo per effetto del rumore dello strumento.

Ciascun costruttore adotta diverse strategie per minimizzare questo effetto, sfruttando il software o l'hardware (esempio raffreddamento del rivelatore) ma l'accuratezza nell'UV è comunque minore rispetto al visibile.

Quando è necessaria una elevata precisione nell'UV si può ricorrere a strumenti a monocromatore, più pesanti e delicati rispetto a quelli a diodi, o ai radiometri a risposta pesata. Questi ultimi possono quindi rappresentare un'alternativa affidabile e relativamente economica.

Nel campo delle sorgenti laser, le misure ai fini della sicurezza sono necessarie quando è importante una verifica di prestazione, come nei laser medicali o quando esiste un dubbio fondato sulle caratteristiche dichiarate dal costruttore.

Nella verifica di prestazione dei laser medicali, può essere importante controllare l'allineamento fra il fascio di puntamento visibile, di solito rosso, e il fascio di trattamento IR, in questo caso come nella **Figura 14** è importante il ruolo della fotocamera sensibile anche nell'IR, a occhio nudo la macchia generata dal laser (laser spot) è invisibile.

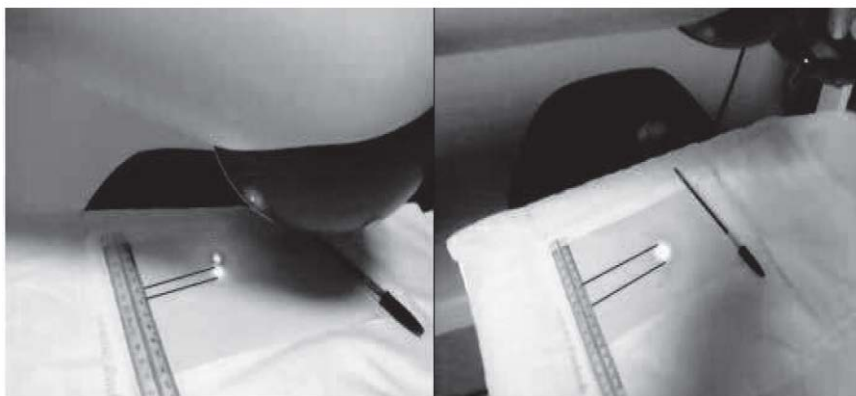


Figura 14: allineamento fra fascio di trattamento e fascio di puntamento in un laser per fisioterapia

La misura più importante per la verifica delle prestazioni dei laser è quella della potenza.

Il tipo più diffuso di power meter è basato su rivelatori termici che presentano risposta piatta fra 200 e 6000 nm. Power meter con sensibilità alle potenze basse possono essere impiegate anche per applicare l'espressione (9) alla valutazione delle sorgenti incoerenti nell'IR.

Per le applicazioni industriali dei laser, tipicamente il taglio, la misura del fascio diretto è fuori discussione, trattandosi di alcuni kW su superfici di millimetri, il punto di interazione in compenso è spesso una sorgente di radiazione incoerente e come tale va studiata, se proprio non si riesce a evitare l'esposizione con provvedimenti tecnici.

Il limite del power meter termico è la risposta relativamente lenta, in alcuni casi può essere necessaria una valutazione della forma dell'impulso che può essere eseguita mediante un fotodiodo semplicemente accoppiato all'oscilloscopio a memoria digitale.

Nella **Figura 15** si vede come un laser definito continuo nel manuale di istruzioni, in effetti genera impulsi da 100 ms spaziatì di 600 ms, il che, dal punto di vista dei VLE applicabili è abbastanza diverso.

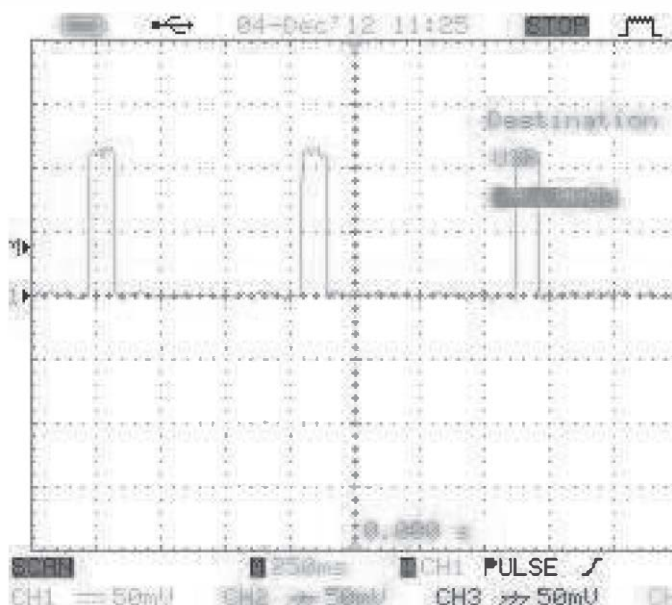


Figura 15: l'emissione di questo laser per fisioterapia è definita "continua" nel manuale di istruzioni

Bisogna infine ricordare che il laser è sì in linea di principio una sorgente monocromatica di lunghezza d'onda assegnata, ma la radiazione laser può essere innescata da altri laser (pompaggio) o, come nel caso del Nd:YAG, il sistema può generare una lunghezza d'onda inferiore a quella della cavità attraversando un particolare mezzo. Il risultato è che un controllo con lo spettroradiometro può essere consigliabile anche se deve essere eseguito con prudenza, per la sicurezza dello spettroradiometro e del suo utilizzatore.

4-CONCLUSIONI

In conclusione, nella **Tabella 1** sono riassunte le principali strumentazioni richieste alle diverse lunghezze d'onda, in considerazione della differente complessità di alcune situazioni possiamo distinguere tra la strumentazione che è indispensabile saper padroneggiare a un livello di base e quella che richiede un livello di conoscenze "specialistico".

Tabella 1: strumentazione richiesta per la valutazione delle sorgenti più diffuse

Intervallo spettrale	Sorgenti tipiche	Livello di base	Livello specialistico
0 Hz	Magneti sollevatori, RM	Teslametro	--
50 Hz	Cabine elettriche	Misuratore di campo B ed E con analisi spettrale FFT	--
50 Hz– 3 kHz	Forni a induzione	Misuratore di campo con analisi spettrale FFT	Misuratore con analisi del picco ponderato
50–300 Hz	Saldatrici elettriche Magnetizzatori- smagnetizzatori per CND	Misuratore con analisi del picco ponderato	Misuratore con analisi del picco ponderato e oscilloscopio
300 Hz– 3 kHz	TMS	Misuratore con analisi del picco ponderato	Misuratore con analisi del picco ponderato e oscilloscopio
300 Hz– 3 kHz	Diagnostica RM	--	Misuratore con analisi del picco ponderato e oscilloscopio
400 kHz– 3 MHz	Tecar Elettrobisturi	Misuratore di campo E e B con analisi spettrale FFT	Misuratore con analisi del picco ponderato e oscilloscopio
27 MHz– 3 GHz	Sorgenti industriali (essicatori, saldatura di materie plastiche)	Misuratore a banda larga	Analizzatore di spettro
5 – 200 MHz	Diagnostica RM	-	Analizzatore di spettro
3 – 70 GHz	Radar	-	Analizzatore di spettro
10,6 μm	Laser CO2	Power meter	Spetttroradiometro
380-3000 nm	Fonderie, acciaierie, cementifici, vetrerie	Radiometri pesati Power meter	Spetttroradiometro
180 – 1400 nm	Laser	Power meter Fotocamera IR	Fotodiodo e oscilloscopio, Spetttroradiometro
180 – 400 nm	Lampade e led	Radiometri pesati	Spetttroradiometro

5-BIBLIOGRAFIA

- [1] Francesco Frigerio, Elio Giroletti, *Introduzione ai rischi fisici*, Medea 2013, ISBN 978-88-6693-033-4
- [2] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). *Guidance on determining compliance of exposure to pulsed and complex non-sinusoidal waveforms below 100 kHz with ICNIRP guidelines*. Health Physics 2003; 84(3):383-387.
- [3] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). *Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)* Health Physics 2010, 99 (6)
- [4] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). *Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)* Health Physics 1998, 74 (4)
- [5] Project VT/2007/017. *An investigation into Occupational Exposure to Electromagnetic Fields for Personnel Working with and around Medical Magnetic Resonance Imaging Equipment*. 2008.
Disponibile all'indirizzo:
<http://www.itis.ethz.ch/assets/Downloads/Papers-reports/Reports/VT2007017FinalReportv04.pdf>.
- [6] Luca Moro, Francesco Frigerio, Irene Carne, Antonio Coppola, *Physica Medica* Volume 30 Issue S1 September 2014 ISSN 1120-1797 Abstracts from the 8th European Conference on Medical Physics *EMF exposure and pulse sequences dependence in 3T MRI*.
- [7] Gianluca Pungillo, Nicola Manini, Francesco Frigerio *Ital. J. Occup. Environ. Hyg.*, 2011, 2(1) 25 – 28 *Black-Body extrapolation of Infrared Irradiance for occupational risk assessment*
- [8] Sisto R, Frigerio F, Militello A., Borra M., Cottica D., and Grignani E., *Annals of Occupational Hygiene* 55 (3).2011. *Modelling Infrared Radiation Exposure by Black body-Like Sources*.

PREPARIAMOCI AD EFFETTUARE VALUTAZIONI CORRETTE DEI CEM E A RIDURRE LE RELATIVE ESPOSIZIONI

Sara Adda

ARPA-Piemonte, Dipartimento Tematico Radiazioni

1 – PREMESSA

La valutazione dei rischi dovuti ai campi elettromagnetici (nell'intervallo di frequenze da 0 Hz a 300 GHz) è resa particolarmente complessa da una serie di fattori, che riuniscono aspetti giuridico-normativi, economici e tecnici e che fanno sì che in Italia l'attuazione di quanto previsto dal DLgs.81/2008, nonché dalle norme europee, sia ancora lontana dall'essere un iter standardizzato e diffuso.

Nella relazione che segue, dopo un inquadramento generale degli elementi che vanno a determinare l'impostazione della valutazione dei rischi e delle criticità ad oggi individuabili, vengono focalizzati i passi essenziali per una buona valutazione del rischio e l'approccio utilizzabile per la riduzione delle esposizioni.

2 – INQUADRAMENTO GENERALE

Il quadro normativo italiano ed europeo, relativo alla valutazione del rischio da campi elettromagnetici, è ad oggi ancora in fase di evoluzione: questo determina una situazione di incertezza su modalità, tempi e ruoli che rende più complessa una materia già ostica per via della varietà di sorgenti e di tipologie di esposizione, dei diversi effetti sulla salute (diretti ed indiretti) di cui è necessario tenere conto, delle difficoltà tecniche.

L'evoluzione negli ultimi anni della norma europea, ad oggi fissata dalla direttiva 2013/35/UE, testimonia sia la complessità della materia, sia la molteplicità di interessi coinvolti. Infatti un serrato dibattito ha accompagnato negli anni l'emanazione delle linee guida ICNIRP, la stesura e l'applicazione della direttiva 2004/40/UE, il recepimento della stessa negli stati membri e la successiva emanazione della direttiva 35.

La situazione attuale può essere così riassunta: la direttiva 2013/35/UE ha abrogato la precedente direttiva 2004/40/UE, introducendo nuove disposizioni per la protezione dei lavoratori dalle esposizioni ai campi elettromagnetici. Il termine di recepimento della nuova direttiva è il 1 luglio 2016, ed entro tale data in Italia il

legislatore dovrà procedere alla modifica delle disposizioni di cui al Capo IV del DLgs.81/2008, provenienti dalla direttiva abrogata.

Il recepimento di questa direttiva in Italia è stato previsto nella Legge di delegazione europea 2014, che è attualmente (aprile 2015) in relazione al senato (DDL 1758), la quale dà delega al governo per l'attuazione di una serie di direttive, tra cui la 2013/35/UE. L'iter per la modifica del DLgs.81/2008 si prospetta quindi come piuttosto lungo. Tuttavia c'è da tenere presente che è in vigore l'obbligo di effettuare la valutazione del rischio, come previsto dal Titolo VIII, Capo I del DLgs.81/2008, pur non essendo in vigore il Capo IV relativo ai limiti da applicare e conseguente regime sanzionatorio.

Nel frattempo, sul piano europeo si lavora alle linee guida per l'attuazione della direttiva, la cui pubblicazione è prevista per il 31 dicembre 2015 ('Non-binding guide to good practice for implementing Directive 2013/35/EU Electromagnetic Fields').

Tali linee guida tecniche, predisposte dall'European Commission Advisory Committee on Safety and Health, conterranno indicazioni circa gli standard europei ed internazionali a cui fare riferimento per la determinazione dell'esposizione, una guida per dimostrare la conformità in situazioni specifiche di esposizione non uniforme, chiarimenti sui metodi del picco ponderato e della somma multifrequenza per il confronto con i limiti, indicazione delle misure per la riduzione dei rischi e degli esami medici e sorveglianza sanitaria da garantire da parte del datore di lavoro. In attesa di queste indicazioni, restano utilizzabili gli standard emanati dal CENELEC (recepiti in Italia dal CEI), ed in particolare la norma EN 50499 "Procedura per la valutazione dell'esposizione dei lavoratori ai campi Elettromagnetici", messa a punto nel quadro del mandato M/351 a suo tempo conferito al CENELEC dalla Commissione Europea per l'attuazione della direttiva 2004/40/UE, ora abrogata.

Riassumendo, il quadro italiano attuale è quindi caratterizzato da un obbligo vigente di effettuare la valutazione del rischio, in assenza però di indicazioni definitive sia sui limiti con i quali confrontarsi, sia sui metodi da seguire. E' però possibile basarsi su alcuni riferimenti, tra cui il documento del coordinamento tecnico delle Regioni per la sicurezza negli ambienti di lavoro [1], per individuare strade percorribili in questa situazione per operare una corretta tutela dei lavoratori.

3 – ANALISI DELLA DIRETTIVA E DELLE SUE RICADUTE

Tenuto conto della complessa situazione normativa che si è venuta a creare, è interessante cercare di dare una risposta alla seguente domanda: in cosa l'introduzione della direttiva 2013/35 modifica l'impianto del Capo IV del DLgs.81/2008, che aveva recepito in toto l'abrogata direttiva 2004/40/UE?

Sulla base della risposta a questa domanda si può infatti chiarire se sia possibile impostare, ancora prima del recepimento della direttiva 35, una valutazione del rischio CEM (obbligatoria per il DLgs.81/2008) ed una politica di formazione e di prevenzione coerenti con gli indirizzi europei, anche in assenza delle linee guida.

Per quanto riguarda l'ambito di applicazione, la nuova direttiva ha un'impostazione del tutto analoga alla precedente: tutela infatti dagli effetti acuti (scientificamente

accertati), mentre non include le ipotesi di effetti a lungo termine. La sola differenza è costituita dall'inclusione dei campi elettrici statici (non compresi nella direttiva 2004/40/UE).

Anche la parte che concerne gli obblighi del datore di lavoro non presenta differenze sostanziali nell'impostazione: è necessario valutare i livelli di esposizione, basandosi su norme di buona tecnica, su database di esposizione e su dati forniti dal produttore degli apparati (queste ultime due voci sono introdotte dalla direttiva 35). La misura non è indispensabile, qualora le informazioni raccolte permettano di escluderne la necessità (impostazione coerente con quanto già previsto anche nello standard EN 50499).

Un'attenzione specifica è riservata, in entrambe le direttive, ai lavoratori particolarmente sensibili al rischio, individuati secondo criteri invariati.

Ciò che costituisce una differenza considerevole rispetto alla precedente impostazione è la modalità di definizione dei valori limite di esposizione (VLE), differenziati in base agli effetti sul corpo umano: stimolazione nervosa periferica (effetti sanitari) e stimolazione del sistema nervoso centrale della testa (effetti sensoriali). Secondo questa impostazione, anche i livelli d'azione (LA) si distinguono in "LA superiori" (correlati agli effetti sanitari) e "LA inferiori" (correlati agli effetti sensoriali).

Ragionando in termini di livelli d'azione, che costituiscono il primo passaggio nella valutazione dell'esposizione, dal punto di vista numerico è possibile osservare (Figura 1) come i livelli fissati dalla direttiva 40 e recepiti al Capo IV del DLgs.81/2008 siano confrontabili, ed in alcuni intervalli di frequenza conservativi, rispetto agli LA superiori (effetti sanitari). Diverso discorso vale invece per gli effetti sensoriali, ai cui limiti è però possibile derogare in alcune condizioni.

Il rispetto degli LA garantisce il rispetto dei VLE (gli LA sono valutati come valori massimi nello spazio occupato dal corpo del lavoratore). Per il caso di esposizione a campi fortemente disuniformi, la direttiva 35 prevede una trattazione specifica del metodo di media spaziale da farsi nelle linee guida tecniche. Questo aspetto resta probabilmente una delle maggiori criticità aperte fino all'emanazione delle linee guida: non esistono infatti attualmente standard generali da utilizzare come riferimento per il calcolo della media spaziale in casi di sorgenti complesse come quelle presenti in alcuni ambienti di lavoro.

In caso di superamento dei livelli d'azione, la direttiva 35 prevede in primo luogo una riduzione dell'esposizione, a meno che non si dimostri il rispetto dei VLE. Questo approccio, maggiormente operativo rispetto a quello previsto dalla direttiva 40, è assolutamente coerente con le indicazioni già fornite nel documento del coordinamento tecnico delle Regioni.

Complessivamente, pertanto, l'impostazione della valutazione dei rischi non è stata radicalmente modificata dalla direttiva 35.

Per quanto riguarda il percorso operativo da seguire, possono essere tenuti a riferimento la norma EN50499 e le indicazioni del documento del coordinamento tecnico delle Regioni, anche tenendo conto dell'impostazione prevista per le linee guida tecniche alla direttiva 35. Esse consisteranno in pratica di due volumi: il primo sarà la guida vera e propria, mentre il secondo dovrebbe presentare dei casi studio a supporto e chiarimento di quanto analizzato.

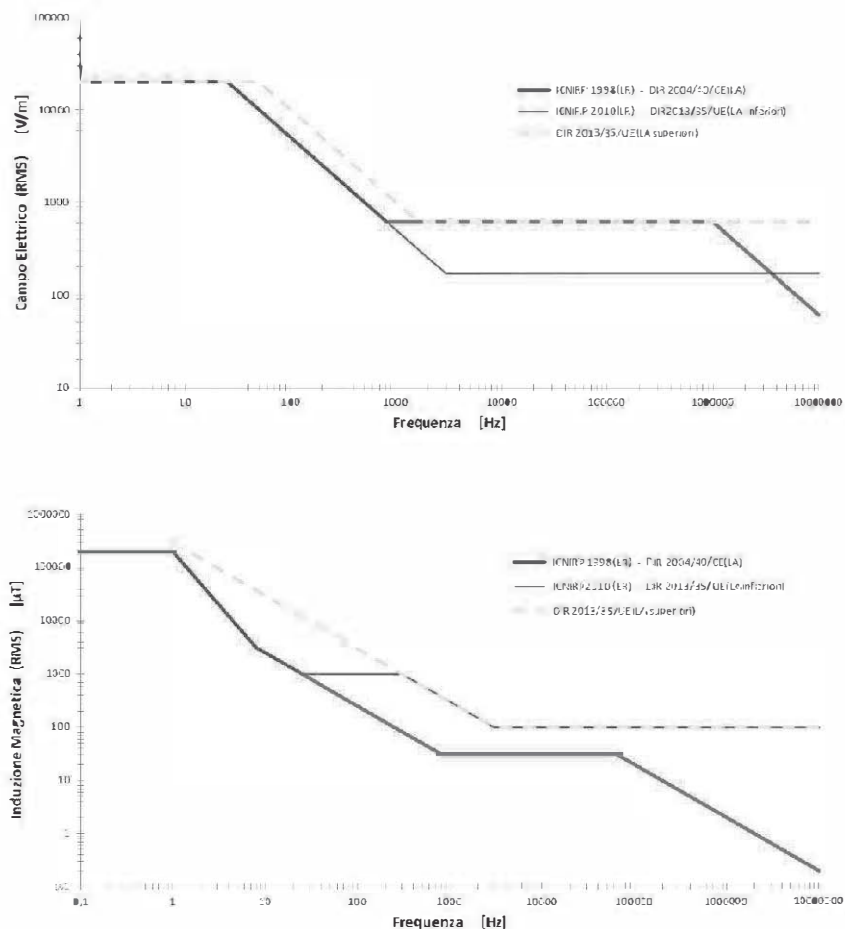


Figura 1: Livelli d'azione per il campo elettrico e l'induzione magnetica nella direttiva 40, nelle linee guida ICNIRP 2010 e nella direttiva 35/2013.

Il primo volume risulterà organizzato in cinque sezioni:

- 1) Sezione dedicata a tutti i datori di lavoro (utile per i casi di cui è possibile accertare la conformità senza leggere l'intera guida)
- 2) Decidere se è necessario procedere con ulteriore approfondimento (con un dettagliato resoconto della struttura della direttiva e della valutazione del rischio)
- 3) Accertamento di conformità (destinato alle situazioni con livelli elevati di campo, per effettuare il confronto con i livelli d'azione)
- 4) E' necessario un ulteriore approfondimento? (misure di prevenzione e protezione per ottemperare alle prescrizioni della direttiva)
- 5) Materiali di riferimento (informazioni dettagliate sugli argomenti emersi nelle sezioni da 1 a 4)

Per quanto riguarda l'aspetto del confronto con i VLE, saranno contenuti nella guida anche dei contributi sugli aspetti computazionali, finalizzati a chiarire quali passi debbano essere svolti per accertare la conformità qualora i livelli d'azione siano superati.

Questa guida sarà presumibilmente un riferimento chiaro ed approfondito, con aspetti per i quali ad oggi non ci sono riferimenti univoci (come ad esempio gli aspetti computazionali per il confronto con i VLE). In sua assenza è però certamente possibile appoggiarsi alla norma 50499, che prevede degli step analoghi:

- 1) Verifica degli apparati presenti nell'azienda e determinazione della loro conformità
- 2) Per gli apparati non conformi, valutazione dell'esposizione ai CEM tramite calcoli o misure (seguendo uno standard quando presente, o determinando il metodo sulla base di norme di buona tecnica)
- 3) Confronto con i valori d'azione
- 4) Eventuale valutazione in funzione dei valori limite di esposizione

3 – COME PREPARARSI AD EFFETTUARE UNA VALUTAZIONE CORRETTA

Alla luce di quanto visto sinora, risulta possibile effettuare una valutazione del rischio CEM corretta e coerente con l'impostazione delle normative italiana ed europea, sulla base di una serie di elementi qui di seguito riassunti.

3.1 IMPOSTAZIONE GENERALE DELLA VALUTAZIONE

Il percorso ed i metodi per la valutazione del rischio definiti nella norma CENELEC EN 50499, e gli approfondimenti riportati nelle indicazioni operative del Coordinamento tecnico per la sicurezza nei luoghi di lavoro delle Regioni e Province autonome, sono, come visto, un valido riferimento anche nel quadro degli aggiornamenti normativi in corso.

Esistono alcuni punti critici, rispetto all'applicazione della direttiva 35, su situazioni piuttosto specifiche che sono evidenziate al nei paragrafi seguenti.

Il sistema di tutela previsto dalla direttiva deve inoltre tenere conto degli specifici gruppi di lavoratori esposti a rischi particolari, nonché evitare i problemi d'interferenza sul funzionamento di dispositivi medici, quali protesi metalliche, stimolatori cardiaci e defibrillatori, impianti cocleari e di altro tipo o dispositivi medici portati sul corpo (quali le pompe insuliniche). Una indicazione precisa per quest'ultimo aspetto viene data dalla norma CENELEC EN 50527: il presupposto delle indicazioni qui contenute è che un'esposizione inferiore ai livelli di riferimento per la popolazione viene considerata non a rischio per i soggetti portatori di dispositivi medici impiantati.

Questa impostazione comporta che una valutazione del rischio in caso di presenza di tali soggetti debba tassativamente comportare la verifica del rispetto dei valori fissati per la popolazione. Tali livelli di riferimento sono attualmente quelli contenuti nella Raccomandazione Europea 1999/519/UE (riferimento anche per la normativa italiana per la protezione della popolazione): essa non è ancora stata aggiornata per

tenere conto delle modifiche ai limiti nell'intervallo della basse frequenze apportate dalle linee guida ICNIRP del 2010.

Lo standard EN 50527 prevede inoltre che il rischio sia non rilevante anche in caso di superamento dei suddetti livelli di riferimento, purché la persona interessata sia stata precedentemente esposta a livelli analoghi senza avere subito conseguenze, e non vi siano state modifiche negli apparati e nelle procedure lavorative.

3.2 CARATTERIZZAZIONE DELLE ATTREZZATURE CHE GENERANO CAMPI ELETTROMAGNETICI

Il principio definito nella norma EN 50499, e ribadito nelle indicazioni operative del coordinamento delle Regioni e Province autonome, riguardo alla **determinazione** di conformità di alcune tipologie di sorgenti in base ad un'analisi documentale, è certamente un elemento discriminante molto utile per individuare in quali casi la valutazione deve procedere con analisi più approfondite, oppure può fermarsi.

Molte attrezzature rispondono in effetti a standard di prodotto che ne definiscono la conformità anche ai livelli di riferimento per la popolazione (raccomandazione 1999/519/UE). Un elenco relativamente aggiornato di questi standard è fornito all'interno delle indicazioni operative del Coordinamento Tecnico delle Regioni (Allegato 4.1). Qualora vi sia rispondenza a questi standard di prodotto, si evidenzia come sia possibile anche certificare la conformità per i portatori di dispositivi medici impiantati.

La Direttiva 35 specifica esplicitamente, inoltre, la possibilità di utilizzare, per la valutazione degli apparati, dati reperibili e rintracciabili in data base accreditati. Ciò significa che se un datore di lavoro dispone di un'attrezzatura (non conforme sulla base di quanto previsto dalla EN 50499) rintracciabile in un database accreditato, potrà far riferimento alla valutazione per quella specifica attrezzatura, purché sia stata condotta in condizioni standard e riproducibili e nel rispetto dei dovuti criteri di qualità per le misure. In Italia esiste una banca dati, disponibile attraverso il Portale Agenti Fisici (www.portaleagentifisici.it), sviluppata dalla ASL 7 di Siena e oggi proposta da INAIL, Regione Toscana e ASL di Modena con un contributo finanziario iniziale del Ministero della Salute. Per quanto riguarda i campi elettromagnetici, il Portale è in fase di sviluppo e contiene un numero crescente di attrezzature già valutate.

Qualora gli apparati presenti in un'azienda richiedano una valutazione specifica delle emissioni, esistono una serie di standard a cui fare riferimento. Esempi di tipologie di sorgenti per le quali esistono norme tecniche di misura (sia per valutare l'esposizione della popolazione, sia dei lavoratori) sono: sistemi di potenza in AC, ferrovie, saldatura ad arco e a resistenza, riscaldamento ad induzione, stazioni radiobase, siti di diffusione radiotelevisiva.

Tra le attrezzature possibilmente critiche per l'esposizione dei lavoratori per le quali non vi sono ancora standard di misura o di valutazione ci sono invece: le varie categorie di riscaldatori RF e microonde (per uso industriale e medico), l'elettrolisi industriale, l'illuminazione con attivazione RF, i sistemi elettrici per il controllo di integrità.

Per le valutazioni su queste tipologie di sorgenti, si aprono due strade: l'accesso a dati accreditati tramite banca dati o direttamente dal costruttore, oppure la

valutazione da effettuare secondo le indicazioni generali delle norme di buona tecnica (quale ad esempio la EN50413 "Norma di base sulle procedure di misura e di calcolo per l'esposizione umana ai campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici (0 Hz-300 GHz)").

E' evidente come questo tipo di valutazione sia uno dei punti soggetti a maggiori criticità, anche legate all'assenza di una figura professionale certificata per questa attività.

Ad oggi non vi sono infatti disposizioni specifiche per i campi elettromagnetici, ma vale la disciplina generale di cui all'art. 32 del Decreto 81 che specifica le competenze richieste agli addetti ai servizi di prevenzione e protezione; tale normativa si rifà anche a un accordo del 2006 stilato in Conferenza Stato-Regioni. I criteri validi in termini generali per il sistema previsto dal Decreto 81/2008 si applicano, nella loro generalità, senza che vi sia nessuna particolarità o disposizione specifica per questo settore.

Uno strumento da cui è possibile trarre indicazioni, pur se non stringenti dal punto di vista giuridico, è il documento stilato dalla Consulta Interassociativa Italiana per la Prevenzione [2], nel quale vengono definiti i requisiti dell'esperto nella valutazione dei rischi derivanti da esposizione a campi elettromagnetici.

3.3 CONFRONTO CON I LIMITI

Nella norma EN 50499 sono inseriti due allegati relativi al tema del confronto con i limiti in caso di esposizione simultanea a più sorgenti o a segnali multifrequenza.

L'allegato E, in particolare, fornisce un possibile approccio semplificato, estremamente cautelativo, tramite il calcolo del Quoziente di Esposizione Totale (TEQ). Esso è costituito dalla somma dei quozienti di esposizione per ciascuna sorgente e gamma di frequenza. Tali quozienti possono essere ricavati da dati forniti dal produttore dell'apparato, da basi dati sugli apparati come il PAF, da dati di letteratura o da misure (chiaramente per le sorgenti non giustificabili a priori). Per il calcolo del TEQ possono essere sommati anche quozienti di esposizione di diversa natura (come per esempio quelli sulla base dei valori d'azione o sulla base dei limiti di esposizione).

Il calcolo del TEQ, assolutamente opzionale, costituisce una stima molto cautelativa, e può quindi fornire una prima indicazione su come proseguire una valutazione dei rischi: se il valore calcolato è inferiore a 1, è possibile dichiarare la conformità degli apparati e degli ambienti di lavoro indagati. Se invece il valore 1 viene superato, sono necessari ulteriori approfondimenti.

Nell'allegato D, invece, vengono indicati i metodi per il confronto dei risultati di misure con i valori d'azione. Queste indicazioni, per quanto riguarda l'intervallo delle basse frequenze, sono presenti anche nella più recente linea guida ICNIRP del 2010, mentre la direttiva 35/2013 non fornisce specifiche su questo aspetto.

Sostanzialmente, le procedure indicate si differenziano per gli intervalli delle basse frequenze e delle alte frequenze.

Per quanto riguarda le basse frequenze (fino a 100kHz), vengono forniti due metodi, applicabili in caso di esposizione a più frequenze simultanee con segnali sinusoidali, oppure per segnali non sinusoidali. Il primo metodo (somma spettrale) può essere

sempre utilizzato, ma può risultare molto conservativo nel caso in cui le componenti spettrali abbiano tra loro sfasamenti fissi e coerenti.

In quest'ultimo caso, il metodo più adeguato è quello del picco ponderato, valido anche in caso di segnali impulsati, che sfrutta una funzione di filtro correlata ai valori limite di esposizione ed ai livelli d'azione. Questo metodo va utilizzato confrontando il valore di picco del segnale pesato (filtrato) con il limite di esposizione (valore d'azione o limite di base) convertito al suo valore di picco alla frequenza di riferimento. In caso di campi con fasi non coerenti e poche componenti spettrali, l'approccio del picco ponderato è identico alla somma spettrale.

Per le frequenze sopra i 100kHz è invece previsto il solo metodo della somma spettrale (quadratica qualora si lavori sui valori d'azione).

La scelta tra i diversi metodi dipende dal bilanciamento tra il grado di cautela scelto e la possibilità di svolgere analisi approfondite, come meglio specificato si seguito.

Il metodo del TEQ, ad esempio, è estremamente conservativo, ma anche di semplice applicazione in quanto permette di mettere insieme informazioni di qualsiasi tipo sui livelli di emissione delle varie sorgenti (ad una certa distanza dalle stesse). Ne è pertanto consigliabile l'utilizzo nel caso in cui siano presenti nell'ambiente di lavoro poche sorgenti non giustificabili a priori, per le quali però si abbia ragionevole certezza, sulla base di dati del costruttore, di letteratura o da basi dati, che alle distanze di utilizzo per quel processo produttivo i livelli di emissione siano significativamente inferiori ai limiti. Un esempio può essere quello di lampade per illuminazione attivate ad RF, come le lampade a basso consumo, installate a soffitto: si tratta di sorgenti non giustificabili a priori, ma per le quali è possibile dimostrare che a distanze maggiori di 30-50cm dalla sorgente i livelli di emissione sono certamente molto inferiori ai valori d'azione [3].

Qualora si effettuino misure di campi elettromagnetici, è poi possibile procedere per step successivi di approfondimento, anche in base alla strumentazione disponibile (par. 3.4). Un primo passaggio è applicabile qualora la misura con uno strumento a banda larga sia adeguata (non segnali impulsati o con troppe componenti spettrali o modulazioni complesse): in questo caso è possibile confrontare il livello in banda larga rilevato con il più basso tra i valori d'azione nell'intervallo di frequenze considerato. Se il valore misurato è inferiore a tale valore d'azione, è possibile certificare la conformità senza successivi approfondimenti. Questo tipo di approccio può ad esempio essere utile in caso di presenza di riscaldatori RF come quelli per l'incollaggio della plastica, che in genere emettono campi sinusoidali ad una certa frequenza, con limitate componenti armoniche e livelli di emissione spesso bassi rispetto ai valori d'azione.

A seguito di questo procedimento, qualora vi sia superamento è necessario effettuare una misura più approfondita con analisi in frequenza o applicazione del metodo del picco ponderato durante la misura.

Nell'intervallo delle basse frequenze (fino a 100kHz), qualora non si disponga di strumentazione con implementazione del picco ponderato, la misura in banda stretta e successiva applicazione della somma spettrale (come prevista sia nella norma EN 50499 sia nelle linee guida ICNIRP 2010) garantiscono un risultato conservativo, utilizzabile per certificare la conformità, ma non per accertare il superamento in assenza delle condizioni di applicabilità del metodo.

3.4 STRUMENTI PER LA MISURA DEI CAMPI ELETTROMAGNETICI

La strumentazione per la misura dei campi elettromagnetici va scelta in base ad una serie di criteri, che vanno dall'intervallo di frequenze di interesse, alla tipologia di segnale (continuo, impulsato, modulato), alle modalità di confronto con i limiti.

La strumentazione in banda larga non permette un confronto diretto con i valori d'azione come previsto dalle norme tecniche, ma può essere un buon compromesso per valutare l'opportunità di proseguire con misure più approfondite, come già introdotto nel paragrafo precedente. Bisogna però tenere in conto il fatto che per alcune tipologie di segnali la misura in banda larga può sottostimare il valore reale, e non è quindi assolutamente adeguata all'indagine. Questo avviene in presenza di segnali con dinamica molto ampia e veloce, come i casi di segnali impulsati (saldatura ad arco, elettrobisturi, radar) o con modulazioni digitali complesse (Wi-Fi).

Per quanto riguarda la misura per il confronto con i valori d'azione, essa può essere eseguita con classiche catene strumentali in banda stretta oppure con strumenti che implementano il metodo del picco ponderato.

Nella prima ipotesi, l'attenzione va posta alla scelta dei sensori (sensibilità, dimensioni, dinamica) e delle performance dello strumento (capacità di seguire segnali impulsati, possibilità di effettuare analisi anche nel dominio del tempo, ecc.), soprattutto nel caso sia necessario effettuare misure su sorgenti con emissioni spettralmente complesse e fortemente disuniformi (ad esempio certi forni ad induzione per il riscaldamento dei metalli [4]).

Per quanto riguarda l'utilizzo di strumenti che implementano il metodo del picco ponderato, quelli disponibili sul mercato fanno generalmente riferimento ad uno specifico standard di limiti (solitamente quelli della linea guida ICNIRP 2010, coerenti con quanto poi previsto dalla direttiva 35/2013). E' importante però osservare come il riferimento ad un solo standard non sia adeguato per il confronto con i livelli di riferimento della raccomandazione 519/UE, confronto che è necessario qualora vi siano lavoratori non professionalmente esposti o portatori di dispositivi medici impiantati.

In questo caso, è importante scegliere uno strumento che implementi il picco ponderato anche su questi limiti, oppure sia in grado di effettuare una normale analisi in banda stretta sulla base della quale calcolare poi la somma spettrale.

3.5 FORMAZIONE ED INFORMAZIONE

La formazione e l'informazione dei lavoratori, oltre ad essere previste da tutte le norme, sono per il rischio campi elettromagnetici un punto fondamentale della prevenzione, in grado spesso di limitare o annullare il rischio senza necessità di interventi sulle attrezzature o sui luoghi di lavoro.

Affiancata infatti alla definizione di corrette procedure lavorative, la conoscenza dei rischi e degli approcci per la loro riduzione da parte dei lavoratori può portare alla risoluzione della maggior parte dei problemi correlati all'esposizione ai CEM (come approfondito nel paragrafo 4 seguente).

La Direttiva 2013/35/UE rafforza peraltro, rispetto alla precedente, gli obblighi a carico del datore di lavoro sull'informazione, con particolare riferimento alla

possibilità di rischi indiretti o di interferenza. Tale informazione assume particolare rilevanza nell'ottica dell'applicazione delle deroghe previste dalla direttiva 35 per il superamento dei livelli d'azione inferiori in situazioni giustificabili (sotto una serie di condizioni molto stringenti).

Le indicazioni operative del coordinamento tecnico delle Regioni forniscono un quadro di quali debbano essere i contenuti della formazione ed informazione, sia per i lavoratori professionalmente esposti che non.

4 – PROCEDURE DI VALUTAZIONE E RIDUZIONE DELL'ESPOSIZIONE

Facendo una sintesi di quanto fino ad ora analizzato, è possibile tracciare un percorso di valutazione del rischio da campi elettromagnetici che possa garantire una buona tutela dei lavoratori ed una coerenza con l'impianto normativo europeo e nazionale.

Seguendo un criterio di massima semplificazione, è pertanto opportuno in primo luogo verificare se nell'ambiente di lavoro siano presenti sorgenti giustificabili a priori (secondo l'elenco riportato nella norma EN50499). Qualora vi siano sorgenti non ricomprese tra queste, è possibile ricercare informazioni sui livelli di emissione in basi dati certificate (come ad esempio il Portale Agenti Fisici), oppure dal produttore (purché si tratti di dati certificabili e ricavati secondo standard tecnici riconosciuti) o in letteratura. Per le sorgenti per le quali tali informazioni non siano disponibili, si dovrà procedere tramite calcolo o misura delle emissioni.

Un primo confronto con i limiti può essere effettuato grazie al calcolo del Quoziente di Esposizione Totale (previsto come opzione nella norma EN50499) o da misure in banda larga, se adeguate, confrontandosi con il più basso valore d'azione nell'intervallo di frequenze analizzato.

La maggior parte delle situazioni lavorative esauriscono il procedimento di valutazione al primo o al secondo di questi step, in quanto la maggior parte degli apparati presenti nei diversi luoghi di lavoro e dei processi produttivi non richiedono ulteriori approfondimenti non dando luogo ad esposizioni significative rispetto ai valori d'azione.

Se invece sono presenti sorgenti e situazioni lavorative che comportano esposizioni più significative (sorgenti con emissioni intense e/o prossimità della postazione di lavoro alla sorgente), è necessario effettuare misurazioni con analisi in frequenza o applicazione del metodo del picco ponderato.

Qualora dalle misure si rilevi il superamento dei livelli d'azione, l'indicazione è quella di mettere in atto sistemi per la riduzione dell'esposizione ai campi elettromagnetici, ed in effetti questo approccio è spesso vantaggioso rispetto al procedere alla valutazione delle grandezze dosimetriche per il confronto con i valori limite di esposizione.

Sovente, in effetti, sono sufficienti pochi accorgimenti logistici ed organizzativi per ridurre le esposizioni, anche perché i livelli elevati di campo elettromagnetico sono nella maggior parte dei casi confinati spazialmente nelle vicinanze della sorgente. Ad esempio, nel caso di riscaldatori e saldatori dielettrici è sufficiente garantire una buona messa a terra dell'apparato ed una corretta manutenzione (verificando che non si creino fessure nel guscio esterno dell'apparato), impedire l'accesso del

lavoratore all'area nelle immediate vicinanze degli elettrodi, realizzare una pedana isolante sulla quale il lavoratore possa svolgere la sua attività.

Nel caso in cui semplici accorgimenti di questo tipo non siano sufficienti, e non si possano modificare le procedure lavorative per mantenere i lavoratori ad una distanza sufficiente dalle sorgenti, sarà necessario progettare dei sistemi attivi o passivi (schermature) per la riduzione delle emissioni.

Un esempio di sistema attivo è quello dell'uso di circuiti di compensazione intorno alle bobine dei riscaldatori ad induzione, mentre schermature possono essere utilizzate per sorgenti nell'intervallo delle radiofrequenze e microonde (riscaldatori, saldatrici, forni).

Per quanto riguarda le reti di alimentazione elettrica (ad esempio le cabine di trasformazione), possono essere messi in atto sistemi piuttosto semplici per la riduzione delle emissioni: avvicinamento delle fasi nei sistemi trifase, utilizzo di distanziatori per spostare i quadri di bassa tensione (che tipicamente generano localmente campi magnetici che possono essere piuttosto elevati), schermi di materiale misto (conduttivo e ad elevata permeabilità magnetica).

Perlopiù, i metodi più efficienti e meno costosi per la riduzione dell'esposizione sono quelli applicati in fase di progettazione delle postazioni di lavoro, scelta delle attrezzature, dei procedimenti e dei metodi. La stessa Direttiva 35 precisa in effetti che "La riduzione dell'esposizione ai campi elettromagnetici può essere realizzata in maniera più efficace attraverso l'applicazione di misure preventive (...)". E' quindi tanto più importante la formazione sia degli RSPP che dei lavoratori, al fine di incidere sui processi di organizzazione del lavoro in termini di prevenzione del rischio campi elettromagnetici.

Tutto il processo di valutazione fin qui visto può essere poi completato da una zonizzazione dell'azienda, ossia dalla distinzione delle zone conformi ai livelli di riferimento per la popolazione, di quelle conformi ai limiti di esposizione occupazionali e di quelle in cui è possibile il superamento di tali limiti, e per le quali dunque è necessaria l'attivazione di misure per la riduzione dell'esposizione oppure la limitazione degli accessi.

5 – CONCLUSIONI

La direttiva 2013/35/UE, che ha abrogato la precedente direttiva 2004/40/UE, ha introdotto nuove disposizioni per la protezione dei lavoratori dalle esposizioni ai campi elettromagnetici, modificando l'impostazione del sistema di protezione dagli effetti sul corpo umano. In particolare, essa separa la gestione per la protezione degli effetti sanitari sicuramente negativi per la salute e la sicurezza (contrazioni muscolari dolorose alle basse frequenze e ustioni alle alte frequenze) da quella per effetti sensoriali (vertigini e altri effetti fisiologici connessi a disturbi dell'equilibrio umano dovuti principalmente al movimento in un campo magnetico statico). Riguardo agli effetti sensoriali, considerati minori, la nuova direttiva presenta un approccio flessibile con possibilità di superamento dei valori limite in modo generalizzato e sistematico pur prevedendone la giustificazione e il controllo da parte del datore di lavoro.

Il termine di recepimento della nuova direttiva è il 1 luglio 2016, ed entro tale data in Italia il legislatore dovrà procedere alla modifica delle disposizioni di cui al Capo IV del DLgs 81/2008, provenienti dalla direttiva abrogata.

Nel frattempo, vige l'obbligo per i datori di lavoro della valutazione del rischio da campi elettromagnetici, che deve tenere conto anche di possibili effetti indiretti, nonché dei lavoratori particolarmente sensibili al rischio.

In questa relazione si è visto come sia possibile impostare correttamente la valutazione dei rischi con riferimento alle norme esistenti in Italia ed in Europa, tenendo conto in particolare del fatto che la maggior parte delle sorgenti e delle situazioni lavorative comportano un iter di valutazione relativamente semplice.

E' anche emerso come sia determinante un approccio preventivo a livello di progettazione delle postazioni di lavoro, scelta delle attrezzature, dei procedimenti e dei metodi, nonché una corretta formazione ed informazione dei lavoratori, la quale permette in molti casi una riduzione drastica dei rischi.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Coordinamento Tecnico per la sicurezza nei luoghi di lavoro delle Regioni e delle Province autonome, *"Decreto Legislativo 81/2008 Titolo VIII, Capo I, II, III, IV e V sulla prevenzione e protezione dai rischi dovuti all'esposizione ad agenti fisici nei luoghi di lavoro - Indicazioni operative"* (2014)
- [2] Consulta Interassociativa Italiana per la Prevenzione, *"Profilo professionale dell'Esperto nella valutazione dei rischi derivanti da esposizione a campi elettromagnetici (ECEM) (0Hz – 300GHz)"* (2006)
- [3] Adda S., Alviano M., Anglesio L., Bonino A., d'Amore G, Facta S., Saudino Fusette S., *"Le nuove lampade a risparmio energetico: valutazione dell'esposizione ai campi elettromagnetici e alla radiazione ultravioletta"*, Atti del Convegno Nazionale Il Controllo degli Agenti Fisici: Ambiente, Salute e Qualità della Vita (ISBN 978-88-7479-118-7 ©2012)
- [4] S. Adda, L. Anglesio, G.d'Amore, M. Fontana, P. Tura, *"Valutazione dell'esposizione a campi elettromagnetici di lavoratori in comparti che utilizzano riscaldatori ad induzione"*, Atti del Convegno Nazionale "Controllo Ambientale degli Agenti Fisici: nuove prospettive e problematiche emergenti" (2009)
- [5] International Commission on Non Ionizing Radiation Protection, *"ICNIRP Guidelines for limiting exposure to electric and magnetic fields (1Hz – 100kHz)"* Health Physics 99(6) (2010)
- [6] European Trade Union Institute – K.H.Mild, M. Sandström, *"Electromagnetic fields in working life – A guide to risk assessment"*(2015)

IL RISCHIO FISICO DA CAMPI ELETTROMAGNETICI E RADIAZIONI OTTICHE NELLE STRUTTURE SANITARIE

Iole Pinto, Andrea Bogi, Francesco Picciolo, Nicola Stacchini

Azienda USL 7 Siena – Laboratorio di Sanità Pubblica – Agenti Fisici – Siena

1 – INTRODUZIONE

Il presente lavoro contiene una sintesi dei risultati delle valutazioni del rischio da esposizione a campi elettromagnetici (CEM) e radiazioni ottiche artificiali non coerenti (ROA) che sono state condotte dagli autori presso strutture sanitarie della Regione Toscana. Le valutazioni sono state condotte a seguito di un censimento preliminare presso le sedi strutture sanitarie pubbliche attive sul territorio regionale delle apparecchiature ed impianti di potenziale interesse dal punto di vista delle emissioni di CEM e ROA.

E' stato quindi individuato un parco macchine rappresentativo delle sorgenti maggiormente diffuse sul territorio regionale, che è stato oggetto di valutazioni specifiche. Nell'ambito del lavoro si presenteranno i principali risultati delle campagne di misura selezionandoli tra quelli che hanno riguardato le categorie di sorgenti di maggior interesse dal punto di vista della prevenzione e protezione dai rischi. I risultati analitici delle misure condotte presso i differenti apparati sono riportati nelle banche dati ROA e CEM del Portale Agenti Fisici [1].

2 – RADIAZIONI OTTICHE

La **Tabella 1** riporta le principali apparecchiature presenti in ambito sanitario che utilizzano sorgenti di radiazioni ottiche artificiali non coerenti di interesse protezionistico, con l'indicazione delle componenti spettrali rilevanti.

In ambito sanitario sono altresì di diffuso e crescente impiego sorgenti Laser. La maggior parte dei Laser impiegati per uso medico chirurgico o riabilitativo rientrano nella classe di rischio IV. Il D.Lgs.81/2008 [2] prescrive che la valutazione del rischio per gli apparati Laser si basi in primo luogo sulla classificazione del Laser e sulle necessarie informazioni fornite dal costruttore ai sensi della norma tecnica 60825-1 [3]. Gli apparati Laser non sono trattati nel presente lavoro. Approfondimenti ed indicazioni operative inerenti le metodologie per la valutazione e prevenzione del rischio nell'impiego dei Laser in medicina sono reperibili nel report AIFM [4] e nei lavori di Tomaselli e coll. [5] e Paralupi e coll. [6] riportati in bibliografia.

Tabella 1: Principali tipologie di sorgenti ROA incoerenti diffuse in ambito sanitario con indicazione delle regioni spettrali di interesse ai fini della valutazione del rischio di esposizione

Tipologia	Regione spettrale	Ambito applicazione
Fototerapia neonatale	Blu/UVA	Neonatologia
Fototerapia	Blu/UV	Dermatologia
Foto polimerizzatori	Blu/UVA	Odontoiatria
Transilluminatori	UV	Laboratori Analisi
Cappe Germicida	UVC	Laboratori Analisi
Lampade Scialitiche	Blu/UVA	Sale Operatorie

Nel seguito si riportano i principali risultati delle valutazioni del rischio e le principali criticità riscontrate nell'ambito delle indagini.

2.1 METODI

Lo studio è stato condotto su un campione di apparecchiature rappresentativo del parco macchine di diffuso impiego presso le strutture sanitarie presenti sul territorio regionale.

Le misure i cui risultati sono discussi nel presente lavoro sono state condotte con la seguente strumentazione:

- Radiometro Marca: DeltaOhm, Modello: HD2402, con il software proprietario per la lettura dei valori delle grandezze considerate
- Spettrometro Jeti modello Specobs 1211UV matricola 2010099. Il Software acquisizione utilizzato è JETI LiMeS Version 4.1.0

La strumentazione è stata sottoposta a calibrazione annuale tracciabile N.I.S.T.

La caratterizzazione spettrometrica delle sorgenti è stata effettuata conformemente alle metodiche definite dallo Standard EN 62471:2008 [5]. Le elaborazioni delle grandezze necessarie alla valutazione del rischio sono state effettuate con programmi opportunamente implementati dagli autori.

Tutte le grandezze e i parametri radiometrici sono stati valutati conformemente a quanto prescritto dalla vigente normativa in materia: Capo V del Titolo VIII del D.Lgs.81/2008.

2.2 RISULTATI

2.2.1 Fototerapia neonatale

Tali apparecchiature sono impiegate nella cura dell'ittero neonatale in terapia intensiva neonatale e presentano tipicamente emissioni di radiazioni ottiche nello spettro di lunghezze d'onda comprese fra 420 nm e 530 nm, considerate la più efficaci nel trattamento della bilirubina [7,9,10]. I risultati delle misure per quanto riguarda il rischio oculare da esposizione a Luce Blu sono riportati in **Tabella 2**.

Tabella 2: Risultati ottenuti per esposizione a Luce Blu L_B [$W\ m^{-2}\ sr^{-1}$] : I tempi massimi di esposizione “ $T_{max\ exp}$ [s]” indicati nell’ultima colonna si riferiscono alla visione diretta della sorgente, cumulati sull’intera giornata lavorativa.

Id.#	Tipo apparecchiatura	Tipo lampada	Distanza sorgente-rivelato. (cm)	Valori misurati L_B [$W\ m^{-2}\ sr^{-1}$]	$T_{max\ exp}$ [s]
1	Medela Bilibed 038.3016	n.1 Tubo Fluorescente Osram Dulux L 18W/71	20	70	14000
2	Natus NeoBlue Mini	LED array	20	8600	115
2	Natus NeoBlue Mini	LED array	50	4	>8h
3	GE Ohmeda - Giraffe Spot PT Lite	1 lampada alog. metallici	40	6200	160
3	GE Ohmeda - Giraffe Spot PT Lite	1 lampada alog. metallici	40 ⁽¹⁾	6.8	>8h
4	Natus NeoBlue	LED array	20	3100	320
4	Natus NeoBlue	LED array	50	1.5	>8h
5	Ginevri IW909E	n. 2 tubi fluorescenti Ginevri	40	41,8	23000
6	Bertocchi mod. GB57	8 tubi fluorescenti Philips TL 20W/03T	20	19	>8h
7	Bertocchi mod. BS BO18	8 tubi fluorescenti Philips TL 20W/03T	20	54,7	18259
8	GE Ohmeda Biliblanket Plus	Fibra Ottica	20	0,2	> 8
9	GE Healthcare Bilisoft	Fibra Ottica	20	6.7	> 8h
10	Cobams P.R.	6 sup. + 6inf. Tubi fluorescenti GE F20T 12 – D Daylight 20W	20	2	> 8h
11	Drager Microlite	3 quartz-halogen	40 ⁽³⁾	110	9000
11	Drager Microlite	3 quartz-halogen	30 ⁽¹⁾	0,7	>8h
12	Atom medical	LED array	50 ⁽³⁾	9800	100
12	Atom medical	LED array	30 ⁽¹⁾	3,4	>8h

Note: (1) = distanza misurata dalla copertura della termoculla: esposizione a fascio riflesso dalla termoculla misurata in posizione corrispondente all’occhio dell’operatore; (2) = esposizione a fascio riflesso dal letto; (3) = posizione neonato

Dallo studio sono emerse le seguenti principali conclusioni:

- Gli apparecchi di fototerapia pediatrica che impiegano sorgenti LED presentano emissioni spettrali nel blu che possono indurre il superamento dei valori limite prescritti dalla vigente normativa per tempi di esposizione dell'operatore dell'ordine dei minuti. Per tali apparati l'impiego di dispositivi oculari di protezione risulta necessario per gli operatori addetti all'assistenza al neonato quando questi operino in prossimità della sorgente, in genere a distanze dalle lampade inferiori o uguali a 1 metro.
- Per alcune apparecchiature che impiegano tubi fluorescenti si sono riscontrate emissioni spettrali rilevanti nella regione UVA. E' da rilevare in merito che l'esposizione ad UVA prodotta da tali apparati è da considerarsi indebita, alla luce della classificazione della radiazione UVA da parte dello IARC tra i cancerogeni certi per l'uomo [11,12,13], essendo peraltro non funzionale ai fini del miglioramento dell'efficacia del trattamento terapeutico [9,10].
- L'indagine ha evidenziato una grande variabilità sia nel tipo che nella potenza delle radiazioni ottiche emesse dai macchinari esaminati. Il conseguimento di emissioni radianti ottimizzate per le lampade usate in fototerapia, attraverso procedure standardizzate di acquisto, collaudo, manutenzione e controlli periodici di qualità di tali macchinari, consentirebbe di rendere più efficace la terapia neonatale, evitare esposizioni indebite ai raggi UVA sia del neonato che degli operatori, e ridurre alla fonte il rischio per gli operatori, secondo quanto prescritto dal D.Lgs.81/2008.
- I dati forniti dai produttori nei manuali d'uso delle apparecchiature risultano in genere carenti ai fini della valutazione del rischio per gli operatori e della formazione ed informazione degli stessi. I produttori dovrebbero essere sollecitati, in sede di capitolato d'acquisto, a fornire le informazioni richieste dal D.Lgs.81/2008 Titolo V, ai fini di consentire la valutazione e riduzione del rischio da esposizione a radiazioni ottiche artificiali già in fase di acquisto di nuove apparecchiature.
- Risulta indispensabile che gli operatori siano formati in merito ai rischi di esposizione alle radiazioni ottiche artificiali emesse da tali apparati e sulle modalità di lavoro più efficaci ed appropriate ai fini della prevenzione del rischio

2.2.2 Lampade fotopolimerizzanti (fotoinduritori)

Tali apparecchiature sono impiegate in odontoiatria per la fotopolimerizzazione dei compositi dentali e presentano tipicamente emissioni di radiazioni ottiche nello spettro di lunghezze d'onda comprese fra 420 nm e 530 nm, corrispondente all'intervallo in cui l'assorbimento della componente fotosensibile è massimo per la maggior parte dei sistemi foto iniziatori dei materiali dentali.

I risultati delle misure per quanto riguarda il rischio oculare da esposizione a Luce Blu sono riportati in **Tabella 3**.

I dati riportati in **Tabella 3** si riferiscono a misure atte alla caratterizzazione della sorgente, e sono state effettuate con una distanza fra rivelatore e sorgente pari a 20 cm, conformemente a quanto prescritto dalla norma EN 62471 [8]. Per caratterizzare l'esposizione dell'operatore durante l'utilizzo dei macchinari, è stata riprodotta una situazione espositiva tipica: si è posizionato l'apparecchio a circa 1 cm da una

superficie bianca riflettente ed è stata misurata la riflessione a 40cm dalla superficie stessa. Tutte le misure sono state eseguite rimuovendo gli schermi che sono in dotazione con gli apparecchi. Dall'indagine è emerso quanto segue:

- Lo spettro di emissione è centrato fra 450nm e 500nm. In particolare le emissioni spettrali degli apparati che usano LED sono centrati intorno a 450 nm. Gli altri che usano generalmente lampade alogene, hanno uno spettro centrato a intorno ai 500nm.
- Sono stati caratterizzati gli schermi in dotazione ad ogni macchinario che sono risultati efficaci nel ridurre le emissioni a livelli di esposizione inferiori ai valori limite, anche per tempi di esposizione oculare di otto ore. Emerge pertanto che l'utilizzo degli schermi in dotazione è una prescrizione di sicurezza indispensabile per un utilizzo sicuro.
- I dati forniti dai produttori nei manuali d'uso delle apparecchiature risultano in genere carenti ai fini della valutazione del rischio per gli operatori e della formazione ed informazione degli stessi. I produttori dovrebbero essere sollecitati, in sede di capitolato d'acquisto, a fornire le informazioni richieste dal D.Lgs.81/2008 Titolo V, ai fini di consentire la valutazione e riduzione del rischio da esposizione a radiazioni ottiche artificiali nei luoghi di lavoro.
- Risulta indispensabile che gli operatori siano formati in merito al rischio oculare dovuto all'esposizione a luce blu emessa da tali apparati in assenza di schermo di protezione e sulla necessità di operare sempre con gli schermi di protezione correttamente installati.

Tabella 3: Risultati ottenuti per esposizione a Luce Blu L_B [$W\ m^{-2}\ sr^{-1}$]: i tempi massimi di esposizione "Tmax exp [s]" indicati nell'ultima colonna si riferiscono alla visione diretta della sorgente, cumulati sull'intera giornata lavorativa

N°	Marca	Modello	Distanza sorgente-rivelatore (cm)	Valori misurati L_B [$W\ m^{-2}\ sr^{-1}$]	Tmax exp [s]
1	Mectron	Bluelight	20	4700	210
2	SDS Kerr	Demetron LC	20	10000	90
4	Hereus	Translux Powerblue	20	4400	230
5	Mectron	Pol-hal II	20	4000	250

2.2.3 – Transilluminatori

Tali dispositivi sono utilizzati come strumentazione di base nei laboratori di analisi per la visualizzazione di gel elettroforetici sensibili ai raggi UV. Le sorgenti utilizzate in tali apparati emettono radiazione UV tipicamente nella regione UV-C con picco a 254 nanometri (nm); UVB con picco a 300 nm o 312 nm; UVA con picco a 365 nm.

I parametri di interesse protezionistico per tali apparati sono l'irradianza efficace (E_s) nell'intervallo UV e l'irradianza totale limitatamente alla regione UVA (E_{UV-A}). Organi bersaglio occhi e cute. Il tempo di esposizione massimo per prevenire il superamento del VLE tipicamente riscontrato per tali apparati, sia dalle indagini condotte dagli autori su tre apparecchiature, sia dai dati di letteratura [17] risulta inferiore a 30 secondi a distanze dell'ordine di 25 cm dalla sorgente ed inferiore a 2 minuti a distanze dell'ordine di 50 cm. Tipicamente gli operatori lavorano a distanze tra i 20 cm ed i 50 cm dalla sorgente.

Dallo studio è risultato che gli schermi di protezione in dotazione forniti dai produttori producono una attenuazione del fascio UV tale da consentire esposizione dell'operatore fino a 5 ore prima del conseguimento del valore limite di esposizione. Le maschere di protezione UV che sono talora fornite in dotazione consentono un'esposizione sicura dell'operatore a 50 cm dalla sorgente anche per esposizioni superiori alle 8 ore.

Al fine di prevenire il superamento dei valori limite di esposizione alla radiazione UV gli operatori che utilizzano i transilluminatori devono essere formati sul corretto impiego degli schermi di protezione, ove presenti. In caso contrario dovranno essere obbligatoriamente indossati dispositivi di protezione idonei per il viso – tipicamente maschera facciale integrale – e proteggere la pelle di mani e braccia con guanti ed indumenti da lavoro.

E' indispensabile un'adeguata formazione del personale sul rischio di esposizione alla radiazione UV prodotta da tali apparati, sulle corrette procedure di lavoro, generalmente riportate nei manuali di istruzione degli apparati di nuova produzione, sull'impiego dei DPI e sulla prevenzione da esposizioni accidentali della pelle e degli occhi.

2.2.4 – Cappe sterili e lampade germicida

Una lampada germicida è un tipo particolare di lampada che produce radiazione ultravioletta con componente spettrale dominante nella regione UV-C.

La radiazione ultravioletta nella regione UV-C modifica il DNA o l'RNA dei microorganismi e quindi impedisce loro di riprodursi o di essere dannosi. Per tale motivo viene utilizzata in diverse applicazioni, quali la disinfezione di cibo, acqua e aria.

Tipicamente le lampade germicida installate in cappe sterili di laboratorio o installate a parete per sterilizzare ambienti sono costituite da lampade al mercurio, con emissione dominante nella riga spettrale a 253 nm (UVC).

I risultati analitici delle misure presso ciascun apparato sono riportati nella banca dati ROA del Portale Agenti Fisci [1]. Di seguito si riporta il quadro di sintesi dei principali risultati ottenuti nel corso dell'indagine.

- **Cappe Sterili da Laboratorio** Le emissioni sono limitate all'intervallo degli UV, essendo la componente spettrale dominante nella regione UVC. Gli organi bersaglio sono la cornea e la cute. Il rischio di esposizione degli operatori alle emissioni UV delle cappe germicida, risulta dipendente dalla tipologia della cappa (presenza o meno dell'interblocco che impedisca l'accensione della lampada in assenza di schermo di protezione) e dal corretto utilizzo delle stesse, qualora non sia presente un sistema di interblocco. In particolare, le misurazioni

effettuate all'esterno, con vetro della cappa completamente chiuso, permettono di verificare l'irrelevanza del rischio per l'operatore. Infatti il tempo di esposizione massimo consentito per prevenire il superamento del valore limite di esposizione risulta essere maggiore di otto ore in tutte le misurazioni effettuate con cappa perfettamente chiusa. Viceversa le misurazioni eseguite con vetro leggermente aperto, che rappresenta una condizione operativa non escludibile a priori per sistemi non muniti di interblocco, hanno mostrato che la riflessione attraverso il piano di lavoro può provocare, ad un operatore che stazioni nei pressi della cappa, esposizioni superiori ai valori limite. I tempi massimi di esposizione che comportano il superamento dei valori limite per occhi e cute sono tipicamente di pochi secondi e sono riportati nella Banca Dati ROA del Portale Agenti Fisici. Le cappe con interblocco impediscono l'esposizione nelle normali condizioni di utilizzo. Si noti che comunque i vetri di alcune cappe possono essere socchiusi senza far scattare l'interblocco, a causa delle caratteristiche meccaniche del dispositivo di interblocco stesso: in queste condizioni un operatore che si trovi molto vicino alla cappa può essere esposto ad una lamina di radiazione ultravioletta che è comunque in grado di provocare esposizioni di occhi e cute superiori ai limiti di esposizione in pochi secondi. Da tali considerazioni emerge che l'informazione e la formazione sul rischio da ultravioletti per gli operatori addetti alle cappe è indispensabile anche per le apparecchiature dotate di interblocco.

- *Lampade Germicida a parete/soffitto.* Come nel caso delle cappe, le emissioni delle lampade germicida a parete sono nella regione spettrale degli UVC; gli organi bersaglio sono: cornea, congiuntiva, cristallino e cute. Le misurazioni effettuate in condizione di esposizione diretta dell'operatore, (ad altezza operatore), alla radiazione emessa dalla lampada installata a soffitto a 3 metri dal pavimento, evidenziano esposizioni particolarmente elevate, che comportano il superamento dei limiti di legge in pochi secondi di esposizione, per un soggetto non protetto. Sulla base di tali evidenze appare indispensabile che tutti i lavoratori che a qualsiasi titolo accedono ai locali ove sono installate tali lampade siano a conoscenza delle procedure di sicurezza e le rispettino con consapevolezza. E' indispensabile prevenire l'accesso al locale a soggetti non protetti, nel caso in cui le lampade siano in funzione. Una misura di tutela particolarmente efficace a tale proposito è quella di predisporre che l'accensione delle lampade avvenga solo grazie ad appositi interruttori a chiave, e che queste siano affidate solo a personale adeguatamente formato.

Tabella 4: Esempio di risultati delle misure emissione UV da lampade germicida a parete: posizione operatore

Condizioni di Misura	Distanza sensore-lampada [cm]	Altezza sensore [cm]	Irradianza Efficace $S(\lambda)$ [W/m^2]	Durata Massima Esposizione [s]
Diretta	55	160	1,8	17

2.2.5 Lampade Scialitiche

Le lampade scialitiche sono sistemi elettromedicali dedicati all'illuminazione ottimale del campo operatorio, caratterizzati da un particolare effetto ottico dissolvente definito "scialitico" (dal greco *skiá*=ombra e *lyticós*=dissolvente). I valori di esposizione a ROA ottenuti nel corso delle indagini condotte dagli autori su un campione di dieci lampade confermano quanto già riportato in letteratura su questa tipologia di sorgenti [18], nel seguito discusso.

Il team chirurgico in genere non risulta essere esposto a livelli di luce blu superiori al valore limite di esposizione di radianza efficace $LB = 100 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ nel caso di sistemi basati su lampade alogene tradizionali. Viceversa le lampade basate su sorgenti LED possono comportare rischio di esposizione a luce blu per fissazione diretta della sorgente, per tempi di esposizione dell'ordine dei secondi. Considerato che la condizione di fissazione diretta della sorgente non rientra nelle abituali condizioni lavorative riscontrabili in sala operatoria, generalmente anche in questi casi gli operatori non sono da considerarsi esposti a valori di Luce Blu superiori ai limiti stabiliti dalla normativa. Viceversa il paziente può risultare accidentalmente esposto a livelli di luce blu potenzialmente nocivi, se non adeguatamente protetto.

Per quanto riguarda i sistemi basati su lampade alogene, è da rilevare che in alcuni casi l'esposizione ad UVA in prossimità del fuoco può risultare superiore ai valori limite fissati dal D.Lgs.81/2008 Titolo VIII Capo V per tempi di esposizione superiori a 10 minuti.

Tenuto conto di tali aspetti emerge che è sempre necessario evitare l'esposizione diretta dell'occhio del paziente alla luce emessa dalla lampada, in assenza di informazioni certe sul rischio foto biologico fornite dal produttore. E' da rilevare che allo stato attuale i dati forniti dai produttori sul rischio foto biologico di tali lampade risultano in genere carenti ai fini della valutazione del rischio per gli operatori e della formazione ed informazione degli stessi.

Appare altresì necessaria un'adeguata formazione del personale al fine di evitare esposizioni accidentali al fascio luminoso, in considerazione del fatto che l'esposizione oculare in prossimità del fuoco (visione diretta) di alcune lampade scialitiche può superare i limiti di esposizione per UVA e/o Luce Blu. I produttori dovrebbero essere sollecitati, in sede di capitolato d'acquisto, a fornire le informazioni richieste dal D.Lgs.81/2008 Titolo V, ai fini di consentire la valutazione e riduzione del rischio da esposizione a radiazioni ottiche artificiali sia per gli operatori che per i pazienti, già in fase di acquisto di nuovi sistemi.

La possibilità di riduzione del rischio alla fonte dovrebbe essere opportunamente presa in considerazione all'atto dell'acquisto di nuove lampade scialitiche, secondo quanto prescritto dal D.Lgs.81/2008.

2.3 MISURE DI TUTELA

Di seguito si elencano le principali misure di tutela da adottare per le tipologie di apparati oggetto dello studio al fine di ridurre il rischio di esposizione per operatori e personale che a qualsiasi titolo si trovi a transitare nelle vicinanze dei suddetti macchinari.

2.3.1 Procedura per Cappe senza interblocco e con chiusura integrale

Avvertenze da apporre sui macchinari:

- Presenza di raggi UV; Segnalazione rischio ROA con pittogramma simbolo riportato in **Figura 1**;
- Esposizione nociva anche per tempi molto brevi;
- Prima di aprire la cappa assicurarsi di aver spento gli UV;
- Esposizione assente a cappa chiusa;
- Assicurarsi che il pannello porta lampada a raggi ultravioletti sia inserito nella cappa prima di accendere gli UV.”



Figura 1: Segnaletica di pericolo Emissione Radiazioni Ottiche Artificiali

E' necessaria l'informazione e formazione sui rischi da esposizione a raggi ultravioletti degli operatori, e di tutti coloro che a qualsiasi titolo possono entrare nell'ambiente in cui è installata la cappa.

E' indispensabile rendere facilmente identificabile il pulsante di accensione degli UV rispetto agli altri interruttori presenti sulla cappa.

2.3.2 Procedura per Cappe senza interblocco e con chiusura parziale del vetro

Avvertenze da apporre sui macchinari :

- Presenza di raggi UV; Segnalazione rischio ROA con pittogramma simbolo riportato in **Figura 1**;
- Esposizione nociva anche per tempi molto brevi;
- Chiusura del vetro di protezione non completa; non sostare nei pressi del macchinario con lampada UV accesa.

E' necessaria l'informazione e formazione sui rischi da esposizione a raggi ultravioletti degli operatori, e di tutti coloro che a qualsiasi titolo possono entrare nell'ambiente in cui è installata la cappa.

E' indispensabile rendere facilmente identificabile il pulsante di accensione degli UV rispetto agli altri interruttori presenti sulla cappa.

2.3.3 Procedura per Cappe con interblocco

Avvertenze da apporre sui macchinari:

- Presenza di raggi UV all'interno della cappa;
- L'esposizione alla radiazione UV emessa dalla lampada è pericolosa anche per esposizioni molto brevi;
- Possibilità di esposizione ad UV con cappa non correttamente chiusa: accertarsi della totale chiusura della cappa prima di attivare l'emissione UV.
- Esposizione assente a cappa chiusa;

E' necessaria l'informazione e formazione sui rischi da esposizione a raggi ultravioletti degli operatori, e di tutti coloro che a qualsiasi titolo possono entrare nell'ambiente in cui è installata la cappa.

E' indispensabile rendere facilmente identificabile il pulsante di accensione degli UV rispetto agli altri interruttori presenti sulla cappa.

2.3.4 Procedura per ambienti con lampade germicida a parete/soffitto

Avvertenze da apporre sulla porta d'ingresso dell'ambiente interessato:

- Presenza di lampade UV all'interno del locale;
- Emissioni nocive per persone presenti all'interno del locale, con lampade UV accese, anche per esposizioni di breve durata;
- Prima di aprire la porta assicurarsi di aver spento gli emettitori UV;
- Esposizione assente a porta completamente chiusa.

E' necessaria l'informazione e formazione sui rischi da esposizione a raggi ultravioletti e sulle appropriate misure di tutela da mettere in atto per gli operatori, e per tutti coloro che a qualsiasi titolo possono entrare nell'ambiente in cui è installata la cappa.

E' necessario apporre la segnaletica di rischio UV nei pressi dell'interruttore di accensione delle lampade a raggi ultravioletti (**Figura 1**)

Una misura di prevenzione importante è quella di munire i locali di sistemi di segnalazione luminosa che indichino l'accensione delle lampade UV.

Ulteriore misura di prevenzione è che l'interruttore di accensione degli UV sia munito di comando a chiave e che le chiavi siano a messe a disposizione solo al personale specificamente formato sul rischio e sulle appropriate operazioni di accensione e spegnimento degli emettitori UV.

3 – CAMPI ELETTROMAGNETICI

Il rischio da esposizione a campi elettromagnetici resta, nonostante l'intensificarsi degli studi in materia, un argomento complesso, ancora poco conosciuto per quanto riguarda i reali effetti sulla salute e i meccanismi di esplicazione di tali effetti. Per questa ragione è fondamentale, per questo particolare rischio, fornire ai lavoratori e a tutte le figure coinvolte nel sistema di sicurezza aziendale corrette procedure di valutazione e prevenzione del rischio, e una adeguata informazione e formazione sui corretti comportamenti da adottare in tutte le attività in prossimità di sorgenti rilevanti sotto il profilo dell'esposizione a CEM. Tali aspetti assumono particolare rilevanza in ambito sanitario ove sono correntemente utilizzati apparati quali elettrobisturi, defibrillatori, stimolatori neurologici, apparati per magnetoterapia, diatermia etc. che emettono campi elettromagnetici di interesse protezionistico e che possono avere effetti gravi su soggetti con controindicazioni all'esposizione, quali portatori di pacemaker e protesi impiantate, donne in gravidanza, etc.

La principale finalità del lavoro qui presentato è di mettere a disposizione uno strumento operativo che orienti a una risposta corretta ai fini della prevenzione e protezione da campi elettromagnetici [0 Hz- 300 GHz] in ambito sanitario.

Le sorgenti considerate in questo lavoro, elencate in **Tabella 5**, sono state individuate a seguito di un censimento del parco macchine in uso presso le strutture sanitarie pubbliche presenti sul territorio regionale, prendendo in esame tutti gli apparecchi elettromedicali che rispondono ai requisiti delle situazioni da approfondire secondo l'impianto della norma CEI EN 50499 [20], richiamato nelle Indicazioni operative sulla prevenzione e protezione dai rischi dovuti all'esposizione ad agenti fisici nei luoghi di lavori prodotte dal Coordinamento Tecnico delle Regioni – ISS – INAIL [1].

I risultati analitici inerenti ciascun apparato sono riportati nella banca dati CEM del Portale Agenti Fisici e nel rapporto "Campi Elettromagnetici in ambito Sanitario: valutazione e prevenzione dei rischi" [19].

Tabella 5: Principali tipologie di sorgenti CEM diffuse in ambito sanitario di interesse ai fini della valutazione del rischio di esposizione

<ul style="list-style-type: none">– Apparati per magnetoterapia– Apparati per diatermia– Elettrobisturi– Defibrillatori– Stimolatori magnetici transcranici– Tomografi RMN

Nel seguito si riportano i principali risultati ottenuti nel corso dello studio.

Sono esclusi gli apparecchi per tomografia a risonanza magnetica nucleare (RMN), in quanto fin dal 1984 soggetti a specifica normativa di sicurezza. Conseguentemente tali apparati sono già oggetto delle valutazioni specifiche inerenti le esposizioni a CEM, da effettuarsi a cura dell'esperto responsabile della sicurezza RMN, secondo quanto prescritto dalla vigente normativa. Per approfondimenti si rimanda al già citato riferimento bibliografico [19].

3.1 – METODI

Lo studio è stato condotto su un campione di apparecchiature rappresentativo del parco macchine di diffuso impiego presso le strutture sanitarie presenti sul territorio regionale.

Le misure i cui risultati sono discussi nel presente lavoro sono state condotte in collaborazione con CNR – IFAC [19] con la seguente strumentazione:

Misuratore a banda stretta: Marca: NARDA STS S.r.l. Modello: EHP 50 E
Matricola: 120WX30115. Campo di misura: Campo Elettrico e Magnetico [5Hz - 100kHz].

Rivelatore NARDA modello ELF 400, banda passante da 1 Hz a 400 KHz, con risposta in frequenza piatta, con sonde esterne da 100cm² e da 3cm² ed un campionatore Agilent U2531A, quattro canali a 14bit, frequenza di campionamento massima 2MSa/s, per valutare l'andamento temporale del campo magnetico degli apparecchi per stimolazione transcranica, diatermia e per defibrillazione.

Misuratore a banda stretta: Marca: NARDA STS S.r.l. Modello: EHP 200
Matricola: 050WX00526. Campo di misura: Campo Elettrico e Magnetico [9 KHz - 30 Mhz]. Utilizzato per valutare le emissioni degli elettrobisturi.

Le metodiche valutative adottate ai fini della valutazione del rischio sono conformi alle raccomandazioni del Coordinamento Tecnico Regioni -INAIL [2] e ai criteri individuati dalla norma CEI EN 50499 [19].

In particolare, ai fini della valutazione del rischio CEM, laddove siano presenti macchinari o impianti emettitori di campi elettromagnetici potenzialmente nocivi, oltre a determinarne i livelli di emissione, è necessario individuare un insieme di misure di tutela di tipo organizzativo e procedurale, al fine di:

- prevenire l'esposizione di individui con controindicazioni;
- ridurre al minimo l'esposizione dei lavoratori.

La norma CEI EN 50499 [20] propone una procedura per la individuazione, nei luoghi di lavoro, delle aree soggette a livelli di rischio diversi. Questa procedura, che prende il nome di *zonizzazione*, è schematicamente rappresentata in Figura 3. In particolare, si distinguono le seguenti zone:

- **Zona 0:** è la zona in cui i livelli di campo elettrico, magnetico ed elettromagnetico rispettano i limiti per la popolazione generale, oppure in cui tutte le sorgenti presenti sono *conformi a priori*. A questa zona può accedere chiunque, compresi i soggetti con controindicazioni alle esposizioni, quali i portatori di protesi metalliche o di dispositivi elettronici impiantati (con le cautele e le limitazioni precedentemente illustrate), le donne in gravidanza e i minori.
- **Zona 1:** è la zona in cui è possibile che vengano superati i valori limite per la popolazione, ma in cui sono sicuramente rispettati i limiti occupazionali. L'accesso a questa zona deve essere consentito ai soli addetti alla lavorazione specifica in essa effettuata; questi devono essere opportunamente formati ed informati e sottoposti a sorveglianza sanitaria. L'accesso deve invece essere precluso a tutti gli altri lavoratori, agli individui della popolazione ed in particolare ai soggetti con controindicazioni.
- **Zona 2:** è la zona in cui i livelli di esposizione possono superare i valori limite occupazionali. L'accesso a questa zona deve di regola essere interdetto a chiunque.

Le aree dove i livelli di campo possono risultare superiori ai valori limite per la popolazione (zona 1) devono essere segnalate con cartelli che evidenziano la presenza di campi elettromagnetici, in conformità alle normative vigenti in materia di segnaletica di sicurezza (Figura 3). L'accesso a queste aree deve essere consentito solo a personale autorizzato, previa valutazione dell'assenza di controindicazioni specifiche all'esposizione.

Figura 2: procedura di zonizzazione ai sensi dello standard CEI EN 50499.

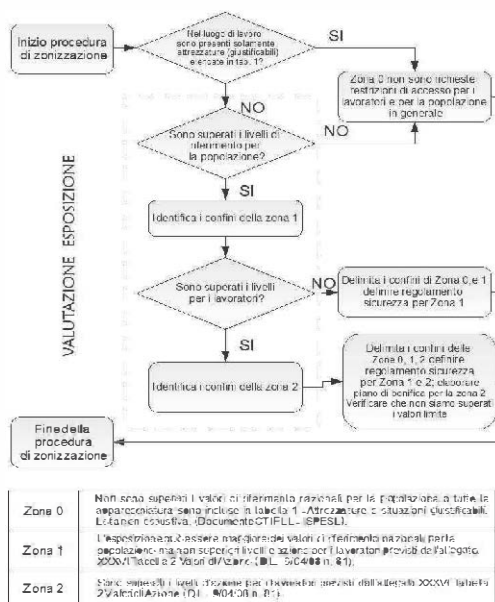


Figura 3: segnaletica di presenza di radiazioni elettromagnetiche.

3.2 RISULTATI

Nel seguito si riportano i principali risultati ottenuti nell'ambito delle valutazioni del rischio condotte per ciascun macchinario, sulla base dei criteri valutativi precedentemente esposti.

3.2.1 Apparati per magnetoterapia

La magnetoterapia utilizza campi magnetici a bassa frequenza (ELF) che sono applicati al paziente introducendo la parte del corpo da trattare all'interno di un circuito conduttore solenoidale percorso da corrente. Si tratta di campi a bassa frequenza con forma d'onda periodica (ripetitiva) che può essere sia sinusoidale sia

di tipo 'onda quadra'. Le frequenze utilizzate sono tipicamente comprese tra 1 Hz e 300 Hz, anche se la maggior parte dei dispositivi sono utilizzati impostando una frequenza di 100 Hz.

Per tutte le apparecchiature per magnetoterapia esaminate la distanza di rispetto per la popolazione è risultata essere di circa 1 metro dal bordo della bobina. Il superamento dei valori di azione per i lavoratori si riscontra solo a pochi centimetri dal bordo stesso.

Normalmente il pannello di comando del macchinario può essere mantenuto ad una distanza tale da permettere all'operatore di rimanere nella zona di rispetto del livello di riferimento per la popolazione.

Per gli operatori addetti alla magnetoterapia e per tutti coloro che si trovino ad operare in prossimità dell'apparato in condizioni di macchinario acceso devono essere predisposte ed attuate le misure di tutela prescritte dalla vigente normativa ed in particolare quelle elencate nel seguito.

- Il macchinario deve essere installato in un locale adibito ad un suo uso esclusivo, adottando opportune misure organizzative tali da evitare che il campo disperso produca esposizioni superiori ai livelli di riferimento per la popolazione sia nei locali adiacenti sia presso il pannello di comando del macchinario, che in genere può essere posizionato a distanza dal lettino.
- Tutti i lavoratori, anche se non direttamente addetti alla magnetoterapia, che abbiano necessità di accedere all'area in prossimità dell'apparato ove si riscontra il superamento dei livelli di riferimento per la popolazione dovranno essere sottoposti ad una valutazione dell'idoneità di esposizione a campi elettromagnetici da parte del medico competente.
- In relazione al precedente punto ed anche al fine di prevenire l'esposizione ai campi elettromagnetici di soggetti con controindicazioni, dovrà essere affissa idonea segnaletica all'ingresso dei locali in cui è possibile il superamento dei livelli di riferimento per la popolazione (figura 5). Andranno inoltre considerate le eventuali aree ove si registra superamento dei valori di azione per i lavoratori, da delimitare sul pavimento con vernice indelebile o sistema analogo.
- Gli operatori dovranno evitare di avvicinarsi al lettino e dovranno possibilmente mantenersi fuori dalla zona di superamento dei livelli di riferimento per la popolazione quando il macchinario è in funzione.
- Gli operatori addetti al macchinario dovranno ricevere adeguata formazione sul rischio da esposizione a campi elettromagnetici e addestramento sulle idonee procedure di lavoro da adottare al fine di ridurre l'esposizione per tutti i soggetti che, a qualsiasi titolo, si trovino in prossimità del macchinario.
- La presenza di oggetti metallici in zone di campo intenso nei pressi dell'apparato deve essere trattata con cautela, tenendo presenti le eventuali avvertenze riportate nella documentazione e se necessario contattando il costruttore o il distributore.
- Tutti i lavoratori che hanno accesso alla magnetoterapia dovranno essere formati sugli effetti dell'esposizione e sulle controindicazioni all'esposizione (Tabella 6).

- I soggetti indicati in **Tabella 6** possono accedere al locale adibito a magnetoterapia solo previa autorizzazione rilasciata dal responsabile dell'apparecchiatura.

La maggior parte delle criticità emerse nel corso del presente studio, sono relative ai seguenti aspetti:

- talvolta non sono messi in atto adeguati controlli di funzionalità dell'apparecchiatura: gli operatori non hanno modo di controllare se il campo magnetico sia effettivamente erogato dall'apparecchiatura e sia corrispondente ai parametri terapeutici impostati;
- spesso i manuali di istruzioni ed uso del macchinario non contengono le necessarie informazioni inerenti la tutela dei lavoratori in relazione al rischio di esposizione a campi elettromagnetici, ed in particolare non documentano le distanze di rispetto riferite ai lavoratori ed alla popolazione.

Tabella 6: soggetti con controindicazioni all'esposizione a campi elettromagnetici di intensità superiore ai livelli di riferimento per la popolazione (elenco a titolo indicativo)

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> – Portatori di pace-maker o altre protesi e dispositivi impiantati dotati di circuiti elettronici – Portatori di clip vascolari, dispositivi e protesi endovascolari o schegge metalliche – Portatori di protesi interne – Donne in gravidanza e minori – Infarto recente del miocardio – Soggetti con patologie del sistema nervoso centrale e soggetti epilettici |
|--|

3.2.2 Apparati per diatermia

La diatermia è una pratica che si basa sull'applicazione al distretto fisico da trattare di una differenza di potenziale, mediante due applicatori (un manipolo ed una piastra di ritorno), a frequenze che possono andare da qualche centinaio di kHz a qualche centinaio di MHz.

A seconda della frequenza applicata si parla di:

- diatermia a microonde (da 915 MHz a 2450 MHz);
- diatermia a onde corte (27,12 MHz o 13,56 MHz);
- diatermia a onde medie e lunghe (da 150 kHz a 3 MHz ma più frequentemente a frequenze dell'ordine dei 500 kHz). In particolare la Tecarterapia® (485 kHz) è una tecnologia proprietaria sviluppata da Unibell International ed è quindi una particolare forma di diatermia ad onde medie.

In questo lavoro si sono presi in esame apparati con frequenza nominale dell'ordine delle centinaia di kHz, pertanto strumenti per la diatermia ad onde medie (apparati per "Tecarterapia"), in quanto di ampia diffusione ed utilizzo. Gli altri apparati sono ormai obsoleti, per quanto ancora utilizzati in alcune strutture.

Dai risultati dello studio è emerso che la distanza di rispetto dei livelli di riferimento per la popolazione è tipicamente di circa 40 cm dagli elettrodi e dai cavi. A distanza

di qualche centimetro dai cavi si ha il superamento dei valori di azione per i lavoratori.

Per gli operatori addetti ad apparati per la diatermia e per tutti coloro che si trovino ad operare vicini ad essi in condizioni di macchinario acceso devono essere predisposte ed attuate le misure di tutela prescritte dalla vigente normativa ed in particolare quelle elencate nel seguito.

- Il macchinario deve essere installato in locale adibito ad un suo uso esclusivo.
 - Tutti i lavoratori, anche se non direttamente addetti agli apparati per diatermia, che abbiano necessità di accedere all'area in prossimità dell'apparato ove si riscontra il superamento dei livelli di riferimento per la popolazione dovranno essere sottoposti ad una valutazione dell'idoneità di esposizione a campi elettromagnetici da parte del medico competente.
 - Al fine di prevenire l'esposizione ai campi elettromagnetici di soggetti con controindicazioni, ed in applicazione di quanto prescritto dalla vigente normativa, dovrà essere affissa idonea segnaletica all'ingresso della sala di impiego dell'apparato (**Figura 5**).
 - Per gli operatori addetti dovranno essere messe in atto le misure di tutela prescritte dalla vigente normativa tra le quali:
 - valutazione dell'idoneità all'esposizione a campi elettromagnetici da parte del medico competente e controlli sanitari periodici;
 - formazione degli operatori sul rischio da esposizione a campi elettromagnetici e addestramento sulle idonee procedure di lavoro da adottare al fine di ridurre l'esposizione durante l'impiego del macchinario come, ad esempio:
 - evitare di portare i cavi a diretto contatto con il corpo durante il trattamento;
 - utilizzare l'apposito manipolo porta elettrodo nel corso del trattamento, evitando il diretto contatto della mano con l'elettrodo.
 - La presenza di oggetti metallici in zone di campo intenso nei pressi dell'apparato deve essere trattata con cautela, tenendo presenti le eventuali avvertenze riportate nella documentazione e se necessario contattando il costruttore o il distributore.
 - Tutti i lavoratori che hanno accesso alla sala di installazione degli apparati dovranno essere formati sugli effetti dell'esposizione e sulle controindicazioni all'esposizione riportate in **Tabella 6**.
 - I soggetti indicati in **Tabella 6** possono accedere alle aree ad accesso limitato solo previa autorizzazione rilasciata dal responsabile dell'apparecchiatura.
- La maggior parte delle criticità attualmente riscontrabili nell'impiego della diatermia a onde medie (tecar terapia), emerse nel corso del presente studio, sono relative ai seguenti aspetti:
- talvolta gli operatori adottano metodiche di lavoro tali da incrementare l'esposizione personale a campi elettromagnetici, ad esempio mantenendo a contatto con il corpo i cavi di collegamento degli elettrodi o tenendo la piastra a diretto contatto con la mano invece di utilizzare il manipolo porta elettrodo;

- i manuali di istruzioni degli apparati generalmente non riportano informazioni di sicurezza complete per la prevenzione del rischio da esposizione a campi elettromagnetici;
- la misurazione strumentale dei livelli di campo può essere difficoltosa a causa della scarsità di strumenti di misura adatti, con particolare riferimento alla protezione dagli effetti di stimolazione, ed alla necessità di determinare i valori di picco istantaneo dei campi.

3.2.3 Elettrobisturi

L'elettrobisturi è un apparecchio elettromedicale che sfrutta una corrente elettrica alternata ad alta frequenza, fatta passare attraverso i tessuti da trattare per ottenere funzionalità di taglio o di coagulazione. La sua azione si esplica grazie al calore che si produce nel tessuto biologico al passaggio delle corrente. L'incremento della temperatura è proporzionale al quadrato della densità di corrente e al tempo in cui essa fluisce. Per evitare effetti di tetanizzazione involontaria dei fasci muscolari, si utilizza corrente alternata di frequenza tipicamente compresa tra 0,4 MHz e 2 MHz.

Per quanto riguarda il rischio di esposizione a CEM, la configurazione monopolare è quella che produce campi elettrici e magnetici dispersi di maggiore intensità. La configurazione bipolare presenta invece una minore rilevanza protezionistica, grazie alla contiguità tra i due conduttori a diverso potenziale (che determina un effetto schermante sul campo elettrico) e alla prossimità della corrente di andata con quella di ritorno (che porta ad una significativa mitigazione dell'induzione magnetica).

Per quanto riguarda la forma d'onda dei campi questa ricalca quella delle correnti (campo magnetico) e delle tensioni (campo elettrico) erogate. In particolare, nella modalità di taglio, la forma d'onda della corrente di lavoro è approssimativamente sinusoidale e stazionaria. Tra la lama del manipolo ed il tessuto sussiste un buon contatto elettrico (cioè una bassa impedenza): pertanto, a questa modalità corrisponde una situazione elettrica in cui, rispetto alla modalità di coagulazione, la tensione applicata al manipolo è più bassa (ma comunque compresa in genere tra 0,5 e 2 kV di picco e in alcuni modelli anche 3 kV di picco) e la corrente più alta (fino a uno o pochi ampere). Nella modalità di coagulazione, la forma d'onda è più complessa e costituita da impulsi o treni di sinusoidi smorzate di durata limitata (dell'ordine delle decine di microsecondi), ripetuti con cadenza regolare dell'ordine di poche decine di chilohertz; a questa modalità corrisponde la situazione in cui la tensione applicata alla lama è massima (fino a valori anche oltre 5 kV di picco in alcuni modelli).

Gli elettrobisturi possono essere considerati come sorgenti NON intenzionali di campo elettrico e magnetico, cioè apparati il cui funzionamento non è intrinsecamente legato all'emissione di un campo magnetico, che quindi può essere considerata come un effetto indesiderato. Infatti l'esposizione degli operatori a campi elettrici e magnetici avviene principalmente a causa dei campi dispersi dai cavi che alimentano il manipolo e che dalla piastra ritornano al generatore. Queste esposizioni (specialmente quella al campo elettrico) potrebbero essere fortemente ridotte schermando i cavi e da qui la scelta di classificare tali sorgenti come non intenzionali.

È opportuno osservare che alle centinaia di chilohertz, ai fini della valutazione del rischio occupazionale, devono essere considerati sia gli effetti termici sia quelli di stimolazione e che quindi a rigore si è interessati sia al valore istantaneo dei campi sia alle intensità mediate su 6 minuti. Tuttavia le pratiche di utilizzo degli elettrobisturi difficilmente implicano sessioni di lavoro più lunghe di qualche decina di secondi e quindi gli indici di esposizione relativi agli effetti termici sono risultati fortemente mitigati per effetto della media temporale.

I risultati delle misure condotte evidenziano quanto segue:

- Gli elettrobisturi di tipo monopolare comportano un'esposizione ai CEM per gli operatori significativamente più elevata di quelli di tipo bipolare.
- Il campo elettrico ha in genere una rilevanza radioprotezionistica superiore; la modalità che comporta un'esposizione maggiore al campo elettrico è quella di coagulo a circuito aperto.
- La modalità che comporta un'esposizione maggiore al campo magnetico è quella di taglio con elevati livelli di potenza.
- I normali muri perimetrali della sala costituiscono una adeguata barriera per la limitazione del campo elettrico disperso all'esterno della sala operatoria.
- Le distanze di rispetto dall'apparecchiatura tipiche sono: 30 cm per il rispetto dei valori di azione per i lavoratori; 70 cm per il rispetto dei livelli di riferimento per la popolazione.
- Il primo operatore in talune modalità può risultare esposto a livelli di campi elettromagnetici superiori ai valori di azione per i lavoratori; questo tuttavia non implica necessariamente un superamento dei valori limite di esposizione.

Per gli operatori che utilizzano gli elettrobisturi monopolari e per tutti coloro che si trovano ad operare in prossimità di tali apparati in condizioni di macchinario acceso devono essere predisposte ed attuate le misure di tutela prescritte dalla vigente normativa ed in particolare quelle elencate nel seguito.

- Il macchinario deve essere installato in locale adibito ad un suo uso esclusivo.
- Tutti i lavoratori, anche se non direttamente addetti all'impiego degli elettrobisturi, che abbiano necessità di accedere all'area in prossimità dell'apparato ove si riscontra il superamento dei livelli di riferimento per la popolazione dovranno essere sottoposti ad una valutazione dell'idoneità di esposizione a campi elettromagnetici da parte del medico competente.
- Al fine di prevenire l'esposizione ai campi elettromagnetici di soggetti con controindicazioni, ed in applicazione di quanto prescritto dalla vigente normativa, dovrà essere affissa idonea segnaletica all'ingresso della sala di impiego dell'apparato (figura 3).
- Per gli operatori che utilizzano elettrobisturi monopolari o che si trovano ad operare nelle vicinanze degli stessi dovranno essere messe in atto le misure di tutela specifiche prescritte dalla vigente normativa tra le quali:
 - valutazione di idoneità all'esposizione a campi elettromagnetici da parte del medico competente e controlli sanitari periodici;
 - formazione degli operatori sul rischio da esposizione a campi elettromagnetici e addestramento sulle idonee procedure di lavoro da adottare al fine di ridurre l'esposizione durante l'impiego del macchinario.

La maggior parte delle criticità attualmente riscontrabili nell'impiego degli elettrobisturi emerse nel corso del presente studio, sono relative seguenti aspetti:

- talvolta gli operatori adottano metodiche di lavoro tali da incrementare l'esposizione personale a campi elettromagnetici, ad esempio mantenendo a contatto con il corpo i cavi di collegamento degli elettrodi;
- i manuali di istruzioni degli apparati generalmente non riportano informazioni di sicurezza complete per la prevenzione del rischio da esposizione a campi elettromagnetici;
- la valutazione per via strumentale dei livelli di campo può essere difficoltosa a causa della scarsità di strumenti di misura adatti, con particolare riferimento alla protezione dagli effetti di stimolazione, ed alla necessità di determinare i valori di picco istantaneo dei campi.

3.2.4 Defibrillatori

I defibrillatori sono una tipologia di apparati biomedicali presente sia nei presidi medici e ospedalieri sia, nella loro versione semiautomatica, in altri ambienti di vita e di lavoro come ad esempio supermercati o impianti sportivi.

Il principio di funzionamento dell'apparecchio consiste nel 'ristabilire una condizione cardiaca stazionaria in pazienti in condizione di arresto cardiaco o di fibrillazione ventricolare, attraverso l'applicazione di una scarica di corrente elettrica' impulsiva. I defibrillatori esterni emettono un impulso elettrico di elevata intensità (2000 / 4000 volt) e breve durata (4 / 20 millisecondi) attraverso il torace del paziente verso il cuore, in modo da restaurare il normale ritmo cardiaco in pazienti in fibrillazione ventricolare o in tachicardia ventricolare non accompagnata da pulsazioni palpabili. Si tratta di sorgenti sia di campo elettrico sia di campo magnetico a bassa frequenza con forma d'onda impulsiva non ripetitiva (evento isolato). I campi sono emessi nell'istante corrispondente alla scarica.

Dalle misurazioni è emerso quanto segue:

- L'intensità (di picco) dell'induzione magnetica in prossimità (pochi centimetri) dai cavi può essere dell'ordine delle decine di microtesla.
- L'intensità (di picco) del campo elettrico in prossimità (pochi centimetri) dai cavi può essere dell'ordine delle centinaia di V/m.
- Dal punto di vista protezionistico, generalmente, il campo elettrico è più rilevante del campo magnetico.
- Le distanze di rispetto dei livelli di riferimento per la popolazione e dei valori di azione per i lavoratori variano sulla base delle differenti tipologie costruttive. Nel seguito ci riferiremo alle distanze relative al campo elettrico che da questo punto di vista è risultato più critico del campo magnetico.
- Nei casi da noi analizzati, riportati in banca dati CEM del Portale agenti Fisici [1] le distanze per il rispetto per la popolazione (confine Zona 0 - Zona 1) variano da 30 cm a circa 60 cm dai cavi, in relazione alle differenti tipologie di defibrillatori.
- Nei casi da noi analizzati le distanze di rispetto per i lavoratori (confine Zona 1 - Zona 2) risultano comprese da 25 cm a 50 cm dai cavi.

- La tecnologia dei macchinari misurati impone talvolta all'operatore di essere nella zona di superamento dei valori d'azione per i lavoratori; questo tuttavia non implica necessariamente un superamento delle restrizioni di base.

Per gli operatori che utilizzano i defibrillatori e per tutti coloro che si trovano ad operare in prossimità di tali apparati in condizioni di macchinario acceso devono essere predisposte ed attuate le misure di tutela prescritte dalla vigente normativa ed in particolare le seguenti:

- Tutti i lavoratori, anche se non direttamente addetti all'impiego del defibrillatore, che abbiano necessità di accedere all'area in prossimità dell'apparato ove si riscontra il superamento dei livelli di riferimento per la popolazione dovranno essere sottoposti ad una valutazione dell'idoneità di esposizione a campi elettromagnetici da parte del medico competente.
- Al fine di prevenire l'esposizione ai campi elettromagnetici di soggetti con controindicazioni, ed in applicazione di quanto prescritto dalla vigente normativa, dovrà essere affissa idonea segnaletica all'ingresso della sala di installazione (Fig. 5)
- Le dimensioni del locale dove si effettua il trattamento e la collocazione del macchinario devono essere tali da garantire che l'area di superamento dei livelli di riferimento della popolazione sia ben contenuta all'interno del locale stesso.
- Qualora l'apparato sia utilizzato in ambiente esterno, o comunque al di fuori delle aree ad accesso regolamentato, gli operatori dovranno provvedere a mantenere gli altri lavoratori e le persone del pubblico ad idonea distanza (almeno 1 metro) dall'apparecchio, al fine di prevenire l'esposizione di soggetti con possibili controindicazioni all'esposizione a CEM.
- I test di funzionalità dell'apparecchiatura in fase di verifica periodica o manutenzione dovranno essere condotti in un locale ad accesso regolamentato, tale da garantire che l'area di superamento dei livelli di riferimento della popolazione sia ben contenuta all'interno del locale stesso e vi sia apposta la cartellonistica di sicurezza (Figura 5).
- Per gli operatori che utilizzano il defibrillatore o che si trovano a operare nelle vicinanze degli stessi dovranno essere messe in atto le misure di tutela specifiche prescritte dalla vigente normativa ed in particolare:
 - valutazione di idoneità all'esposizione a campi elettromagnetici da parte del medico competente e controlli sanitari periodici;
 - formazione degli operatori sul rischio da esposizione a CEM e addestramento sulle idonee procedure di lavoro da adottare al fine di ridurre l'esposizione durante l'impiego del macchinario ed in particolare evitare di portare i cavi a diretto contatto con il corpo durante il trattamento.
- La presenza di oggetti metallici in zone di campo intenso nei pressi dell'apparato deve essere trattata con cautela, tenendo presenti le eventuali avvertenze riportate nella documentazione e se necessario contattando il costruttore o il distributore.
- Tutti i lavoratori che hanno accesso alla sala di installazione degli apparati dovranno essere formati sugli effetti dell'esposizione e sulle controindicazioni all'esposizione riportate in Tabella 6.

- I soggetti indicati in **Tabella 6** possono accedere alle aree ad accesso limitato solo previa autorizzazione rilasciata dal responsabile dell'apparecchiatura.

La maggior parte delle criticità attualmente riscontrabili nell'impiego dei defibrillatori, emerse nel corso del presente studio, sono relative agli aspetti elencati nel seguito.

- I manuali di istruzioni degli apparati generalmente non riportano informazioni di sicurezza complete per la prevenzione del rischio da esposizione a campi elettromagnetici per gli operatori e per l'eventuale 'pubblico' presente nello scenario di esposizione.
- I controlli periodici di funzionalità dell'apparecchiatura non vengono svolti in idonei locali ad accesso regolamentato, rendendo possibili esposizioni a campi elettromagnetici di intensità superiore ai livelli di riferimento per la popolazione, talvolta anche esternamente al locale adibito alla verifica.

3.2.5 Stimolatori Magnetici Transcranici

La Stimolazione Magnetica Transcranica (TMS, dall'inglese Transcranial Magnetic Stimulation) è una metodica che consente di stimolare o inibire la corteccia cerebrale in modo non invasivo.

La metodica fa uso di un apparecchio elettromedicale che genera un campo magnetico mediante una bobina percorsa da corrente. La TMS consiste quindi, sostanzialmente, nella generazione di un intenso campo magnetico rapidamente variabile nel tempo, che induce una corrente elettrica nel cervello. Questa corrente provoca la depolarizzazione delle cellule nervose, cioè le eccita, producendo la stimolazione o l'interruzione dell'attività cerebrale per pochi millisecondi.

Dalle misurazioni su un campione di cinque apparati, riportati in banca dati [1] emerge quanto segue:

- Gli apparati per la TMS possono essere considerati come sorgenti 'intenzionali' di campo magnetico (cioè apparati il cui funzionamento è legato all'emissione di un campo magnetico, che NON può essere considerato come un effetto indesiderato). Per questo motivo in questo lavoro ci si è concentrati sull'induzione magnetica. *Non si esclude comunque che questi apparati possano generare significativi livelli di campo elettrico.*
- Si tratta di campi a bassa frequenza con forma d'onda impulsiva che può essere sia ripetitiva sia non ripetitiva (evento isolato). Ciascun evento ha una durata che può andare dalle centinaia di microsecondi a qualche millisecondo.
- L'intensità dell'induzione magnetica in prossimità (pochi centimetri) dell'applicatore può essere anche superiore ad 1 Tesla.
- Le distanze di rispetto dei livelli di riferimento per la popolazione variano in relazione alle differenti tipologie di apparati. Tipicamente sono comprese tra meno di 1 metro e circa 2,5 metri dall'applicatore.
- I valori di azione per i lavoratori vengono rispettati in genere a partire da distanze comprese tra 60 cm e 180 cm dall'applicatore.
- La metodologia di utilizzo della TMS in genere impone all'operatore di essere nella zona di superamento dei valori d'azione per i lavoratori; questo tuttavia non implica necessariamente un superamento dei valori limite di esposizione.

Per gli operatori che utilizzano apparati per TMS e per tutti coloro che si trovino ad operare in prossimità degli stessi, in condizioni di macchinario acceso, devono essere predisposte ed attuate le misure di tutela prescritte dalla vigente normativa ed in particolare le seguenti:

- Il macchinario deve essere installato in locale adibito ad uso esclusivo dello stesso. In particolare, le dimensioni del locale dove si effettua il trattamento e la collocazione del macchinario devono essere tali da garantire che l'area di superamento dei livelli di riferimento della popolazione sia ben contenuta all'interno del locale stesso.
- Tutti i lavoratori, anche se non direttamente addetti all'impiego di stimolatori magnetici transcranici, che abbiano necessità di accedere all'area in prossimità dell'apparato ove si riscontra il superamento dei livelli di riferimento per la popolazione, dovranno essere sottoposti ad una valutazione dell'idoneità all'esposizione a campi elettromagnetici da parte del medico competente.
- Al fine di prevenire l'esposizione ai campi elettromagnetici di soggetti con controindicazioni, ed in applicazione di quanto prescritto dalla vigente normativa, dovrà essere affissa idonea segnaletica all'ingresso della sala di installazione (Figura 3).
- Qualora l'apparato sia utilizzato al di fuori delle aree ad accesso regolamentato, gli operatori dovranno provvedere a mantenere gli altri lavoratori e le persone del pubblico ad idonea distanza (2–3 metri) dall'apparecchio, al fine di prevenire l'esposizione di soggetti con possibili controindicazioni all'esposizione a CEM.
- I test di funzionalità dell'apparecchiatura effettuati durante le verifiche periodiche o gli interventi di manutenzione, dovranno essere condotti in un locale ad accesso regolamentato, tale da garantire che l'area di superamento dei livelli di riferimento della popolazione sia ben contenuta all'interno del locale stesso e vi sia apposta la cartellonistica di sicurezza (fig 5).
- Per gli operatori che utilizzano gli stimolatori magnetici transcranici o che si trovano a operare nelle vicinanze degli stessi dovranno essere messe in atto le misure di tutela specifiche prescritte dalla vigente normativa ed in particolare:
 - valutazione di idoneità all'esposizione a campi elettromagnetici da parte del medico competente e controlli sanitari periodici;
 - formazione degli operatori sul rischio da esposizione a CEM e addestramento sulle idonee procedure di lavoro da adottare al fine di ridurre l'esposizione durante l'impiego del macchinario.

La maggior parte delle criticità attualmente riscontrabili nell'impiego di tali apparati, emerse nel corso del presente studio, sono relative ai seguenti aspetti.

- I manuali di istruzioni degli apparati generalmente non riportano informazioni di sicurezza adeguate inerenti la prevenzione del rischio da esposizione a CEM per gli operatori e le persone del pubblico che si trovino in prossimità dell'apparato.
- I locali ove sono installate le apparecchiature non sono solitamente individuati come aree specifiche ad accesso regolamentato, precluse ai soggetti con controindicazioni all'esposizione.

- Talvolta si riscontrano esposizioni a CEM superiori ai livelli di riferimento per la popolazione anche esternamente ai locali ove sono installate le apparecchiature, con conseguenti rischi per eventuali soggetti con controindicazione all'esposizione che si trovino in tali aree.
- L'eventuale operatore che impugna l'applicatore è molto spesso esposto a livelli di campo superiori ai valori di azione per i lavoratori; questo tuttavia non implica necessariamente un superamento dei valori limite di esposizione.
- Per motivi clinici, l'utilizzo degli appositi supporti, che pure esistono, non sempre è possibile o accettato, specialmente quando l'operatore desidera avere il pieno controllo dell'area stimolata.

4 – CONCLUSIONI

Nell'ambito del lavoro si è presentata una rassegna dei principali risultati delle campagne di valutazione del rischio da esposizione a ROA e CEM in ambito sanitario condotte dagli autori.

Il rischio in genere può essere opportunamente controllato e prevenuto mediante l'adozione di appropriate misure organizzative, e soprattutto mediante una corretta e puntuale formazione dei lavoratori addetti all'impiego di tali apparati. Le principali criticità attualmente riscontrabili per la maggior parte delle sorgenti CEM/ROA emerse nel corso delle indagini e riportate nel presente lavoro, sono riconducibili ai seguenti aspetti:

- i manuali di istruzioni degli apparati emettitori di ROA e CEM generalmente non riportano informazioni di sicurezza complete per la prevenzione del rischio da esposizione a campi elettromagnetici e ROA;
- spesso gli operatori non sono consapevoli del rischio di esposizione a CEM/ROA emessi dagli apparati ed impiegano metodiche operative non ottimali ai fini della riduzione dell'esposizione: ad esempio nel caso delle tecar terapie mantenendo a contatto con il corpo i cavi di collegamento degli elettrodi o tenendo la piastra a diretto contatto con la mano invece di utilizzare il manipolo porta elettrodo, oppure nel caso delle terapie neonatali sono spesso utilizzate lampade che espongono a radiazioni UV o blu di elevata intensità e non necessarie ai fini terapeutici;
- spesso gli operatori non sono consapevoli che i CEM emessi dall'apparato possono avere effetti nocivi gravi per soggetti con controindicazioni all'esposizione e delle distanze di rispetto da adottare per evitarne l'esposizione (cfr. stimolatori transcranici, defibrillatori, apparecchiature per tecar terapia)
- la misurazione strumentale dei livelli di campo elettromagnetico emessi da alcuni apparati (es. defibrillatori, elettrobisturi, tecar terapia) può essere difficoltosa a causa della scarsità di strumenti di misura adatti, con particolare riferimento alla protezione dagli effetti di stimolazione, ed alla necessità di determinare i valori di picco istantaneo dei campi.

5 - BIBLIOGRAFIA

1. www.portaleagentifisici.it
2. Coordinamento Tecnico per la sicurezza nei luoghi di lavoro delle Regioni e delle Province autonome: "Decreto Legislativo 81/2008, Titolo VIII, Capo I, II, III, IV e V sulla prevenzione e protezione dai rischi dovuti all'esposizione ad agenti fisici nei luoghi di lavoro Indicazioni operative"
<http://www.portaleagentifisici.it/DOCUMENTI/>
3. CEI EN 60825-1 (classificazione CEI: 76-2): "Sicurezza degli apparecchi laser – Parte 1: Classificazione delle apparecchiature, prescrizioni e guida per l'utilizzatore"
4. Gruppo AIFM NIR Laser Medicali: Tipologie, Analisi Dei Rischi, Procedure Di Sicurezza, Controlli Report AIFM 5/2009
http://www.fisicamedica.it/aifm/report/2009_n5_ReportAIFM.pdf
5. A.Tomaselli, D. Milani Metodologie e Strumentazione per la Valutazione del Rischio LASER Atti **dBA_incontri 2011** pag. 117-132
6. G.Taino, P.Paralupi, M. Giorgi Esposizione a Radiazione Laser e Rischi per la Salute con Particolare Riguardo all'Utilizzo in Campo Medico Atti **dBA_incontri 2011** pag. 87-102
7. IEC-EN 60601-2-50 Medical electrical equipment Part 2: Particular requirements for the safety of infant phototherapy equipment - CENELEC 2000
8. EN 62471: 2008, Photobiological safety of lamps and lamp systems CENELEC 2008
9. AMERICAN ACADEMY OF PEDIATRICS CLINICAL PRACTICE GUIDELINE Subcommittee on Hyperbilirubinemia Management of Hyperbilirubinemia in the Newborn Infant 35 or More Weeks of Gestation
10. Ennever JF. Blue light, green light, white light, more light: treatment of neonatal jaundice. Clin Perinatol. 1990;17:467-481
11. WORLD HEALTH ORGANIZATION - INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER Exposure To Artificial Uv Radiation And Skin Cancer [IARC Report 2006]
12. ICNIRP 14/2007 Protecting Workers from Ultraviolet Radiation International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. In Collaboration with: International Labour Organization World Health Organization ISBN 978-3-934994-07-2
13. IARC, (1992), Monographs on the Evaluation of Carcinogenetic Risks to Humans. Solar and Ultraviolet Radiation, Vol. 55.
14. IRPA/INTERNATIONAL NON-IONIZING RADIATION COMMITTEE, (1985), Guidelines on limits of exposure to UV radiation of wavelengths between 180 nm and 400 nm (Coherent optical radiation), Health Physics 49, 331-340.
15. INTERNATIONAL NON-IONIZING RADIATION COMMITTEE ICNIRP Guidelines on limits of exposure to broad-band incoherent optical radiation (0,38 to 3 µm) Health Physics, September 1997, Vol. 73, N.3
www.icnirp.org/documents/broadband.pdf
16. INTERNATIONAL NON-IONIZING RADIATION COMMITTEE "Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths between 180 nm and

- 400 nm (incoherent optical radiation)” Health Physics, August 2004, Vol. 87, N.2 www.icnirp.org/documents/UV2004.pdf
17. Farhang Akbar-Khanzadeh & Mahdi Jahangir-Blourchian (2005) Ultraviolet Radiation Exposure from UVTransilluminators, Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 2:10, 493-496
 18. HPA (Health Protection Agency) UK. A non-binding guide to the artificial optical radiation directive 2006/25/ec. Contract VC/2007/0581, 2010.
 19. Andrea Bogi, Iole Pinto, Nicola Stacchini, Daniele Andreuccetti, Nicola Zoppetti Campi Elettromagnetici in ambito Sanitario: valutazione e prevenzione dei rischi – Ed. Geco Eventi Pisa 2013
http://portaleagentifisici.usl7.toscana.it/filemanager/userfiles/DOCUMENTAZIONE/NIR_DOCUMENTAZIONE/RapportoCEM_2013.pdf?lg=IT
 20. Comitato Elettrotecnico Italiano: "Procedura per la valutazione dell'esposizione dei lavoratori ai campi elettromagnetici". Norma CEI EN 50499, novembre 2009.

VALUTAZIONE DELL'ESPOSIZIONE OCCUPAZIONALE AI CAMPI ELETTROMAGNETICI IN MRI: UNA PROCEDURA PER LA STIMA DEI PARAMETRI DEFINITI DALLE LINEE GUIDA INTERNAZIONALI

Stefania Romeo⁽¹⁾, Anna Sannino⁽¹⁾, Olga Zeni⁽¹⁾, Maria Rosaria Scarfi⁽¹⁾, Rita Massa^(1,2), Vincenzo Cerciello⁽³⁾, Raffaele d'Angelo⁽⁴⁾

¹: CNR – Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente, Napoli

²: Università di Napoli Federico II – Dipartimento di Fisica, Napoli

³: Istituto Nazionale Tumori IRCCS Fondazione G. Pascale, Napoli

⁴: INAIL – Direzione regionale per la Regione Campania, Napoli

1 – PREMESSA

Le attività descritte nel presente contributo si innestano nell'ambito del progetto di collaborazione tra l'INAIL-Campania e l'Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente (IREA) del CNR di Napoli, avente come obiettivo la valutazione dell'esposizione di operatori sanitari ai campi magnetici statici (CMS) utilizzati per apparati di Imaging a Risonanza Magnetica (MRI).

L'imaging a risonanza magnetica (MRI) è una metodologia clinico-diagnostica utilizzata per ottenere immagini bi- e tri-dimensionali, e ad elevata risoluzione, di sezioni del corpo umano. Il suo utilizzo è diffuso non solo in ambito clinico, ma anche nella ricerca pre-clinica, nei settori della chimica, biochimica, geofisica e in applicazioni agroalimentari.

Il principio fisico alla base della MRI consiste nell'assorbimento risonante e nella ri-emissione di radiazione a radiofrequenza (RF) da parte di protoni immersi in un intenso campo magnetico statico. Per indurre tale fenomeno di risonanza, si utilizza la combinazione di un intenso campo magnetico statico, di campi di gradiente pulsati a frequenze nelle regioni ELF (extremely low frequency) e VLF (very low frequency), e di campi magnetici pulsati a radiofrequenza. E' importante far notare che, mentre il campo magnetico statico è costantemente presente all'interno della sala (per motivi tecnologici non viene mai "spento", se non in situazioni di emergenza), i campi di gradiente e quelli a RF risultano attivi soltanto durante l'esecuzione dell'esame clinico-diagnostico. Una sala MRI si configura, di conseguenza, come un ambiente di lavoro caratterizzato dalla presenza, anche simultanea, di diverse sorgenti di campi elettromagnetici non ionizzanti, ai quali risultano esposti sia i pazienti che si sottopongono ad un esame clinico-diagnostico, sia i lavoratori durante lo svolgimento delle proprie attività. Diverse categorie professionali risultano esposte, ovvero tutti i lavoratori che devono transitare, per motivi differenti, all'interno di una sala MRI: medici, tecnici di radiologia, infermieri, personale addetto alla pulizia, tecnici ed ingegneria addetti alla manutenzione ordinaria e straordinaria della strumentazione.

Il problema dell'esposizione occupazionale ai campi elettromagnetici non ionizzanti è stata affrontato attraverso l'emanazione di linee guida e direttive internazionali

volte a definire i limiti di esposizione per i lavoratori sulla base di effetti biologici e sintomi sensoriali riscontrati in ricerche *in vitro*, *in vivo* e in studi epidemiologici. In particolare, il 29 giugno 2013 è stata pubblicata sulla Gazzetta ufficiale dell'Unione Europea la Direttiva 2013/35/UE sulle disposizioni minime di sicurezza e di salute relative all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici (campi elettromagnetici) che ha abrogato la direttiva 2004/40/CE a decorrere dal 29 giugno 2013 [1]. La nuova direttiva si basa sulle linee guida ICNIRP del 2009 e del 2010 [2, 3] e fornisce nuovi criteri di definizione dei limiti di esposizione dei lavoratori dai campi elettrici e magnetici statici fino ai campi elettromagnetici a RF. Il recepimento di questa direttiva da parte degli Stati membri è previsto entro il 1 luglio 2016.

Un altro importante riferimento normativo internazionale è rappresentato dalle linee guida ICNIRP del 2014, nelle quali viene affrontato il problema di limitare l'esposizione ai campi elettrici indotti nel corpo umano dai movimenti nella zona in cui è presente il campo magnetico statico, e da campi magnetici lentamente variabili nel tempo (a frequenze minori di 1 Hz) [4]. Infatti, l'esposizione al CMS *tout court* avviene solo se la persona rimane ferma all'interno dello spazio in cui il CMS è presente. Tale condizione, tuttavia, si realizza solo in determinate situazioni, e per intervalli di tempo relativamente brevi. Nella maggior parte dei casi, invece, gli operatori sono in movimento all'interno della sala magnetica, dove è presente un gradiente spaziale del CMS. L'effetto di questo movimento è l'induzione di campi elettrici e correnti nei tessuti corporei che, se al di sopra di determinate soglie, possono indurre nel lavoratore effetti sensoriali transitori quali vertigini, nausea, magnetofosfeni, sapore metallico. Tali effetti, pur non essendo dannosi di per sé, possono essere sgradevoli ed ostacolare il regolare svolgimento dell'attività lavorativa. Nelle linee guida ICNIRP il problema è stato affrontato in maniera esplicita attraverso la definizione di restrizioni di base e livelli di riferimento, atti a prevenire il verificarsi di tali fenomeni acuti. In particolare, le restrizioni di base sono state definite in termini di variazione del valore di induzione magnetica esterna al corpo (ΔB), parametro verosimilmente legato all'induzione degli effetti sensoriali, e di campo elettrico interno al corpo, responsabile della stimolazione nervosa. Il rispetto delle restrizioni di base, che sono grandezze non sempre direttamente e/o facilmente misurabili è garantito dal rispetto dei livelli di riferimento, definiti in termini di variazione temporale dell'induzione magnetica determinata dal movimento (dB/dt).

Allo scopo di analizzare l'andamento di tali parametri, è stato sviluppato un codice in ambiente MATLAB che permetta di prevedere, in prima approssimazione, l'esposizione occupazionale del personale sanitario di MRI in movimento nel gradiente spaziale di induzione magnetica durante il proprio turno di lavoro, in termini sia di induzione magnetica e sua variazione temporale, sia di campo elettrico interno e densità di corrente indotti nei tessuti. Il codice, una volta implementato e validato per confronto con dati di letteratura, è stato poi utilizzato per stimare i valori di campo elettrico e densità di corrente indotti in un caso reale. A questo scopo, sono state effettuate delle misure campo magnetico statico mediante l'utilizzo di un dosimetro personale indossato da operatori MRI dell'Istituto Nazionale Tumori - IRCCS "Fondazione G. Pascale" durante il regolare svolgimento dell'attività lavorativa. Dall'analisi numerica di diversi casi di esposizione

professionale condotta con tale codice di simulazione, è stato possibile, tenendo conto delle approssimazioni effettuate e delle incertezze legate sia alla misura sperimentale sia all'analisi numerica, fare alcune considerazioni interessanti in merito alla protezione dei lavoratori in MRI.

Nel presente contributo saranno riportati i risultati numerici relativi a due diversi casi di esposizione

2 – MATERIALI E METODI

In questa sezione verranno descritte le leggi fisiche alla base del codice di calcolo sviluppato per simulare diverse situazioni di esposizione dovute al movimento dei lavoratori in MRI, le fasi di implementazione del codice, e i risultati dell'analisi numerica in diversi casi di esposizione occupazionale.

2.1 – LEGGI FISICHE DI BASE

Dalla terza equazione di Maxwell, che esprime il legame tra un campo di induzione magnetica tempo-variante, in un sistema dotato di cariche, ed il campo elettrico si ha:

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{d\bar{B}}{dt}, \quad (1)$$

che in forma integrale è nota come legge di Faraday:

$$\oint_{\Gamma} \bar{E} \cdot d\bar{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \bar{B} \cdot d\bar{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (2)$$

dove Φ_B è il flusso di induzione magnetica concatenato alla spira di superficie S e contorno Γ .

Da un punto di vista matematico, per una spira circolare di raggio r , l'ultima relazione si può semplificare come segue:

$$\oint_{\Gamma} \bar{E} \cdot d\bar{l} = \oint_{\Gamma} E \cdot dl \cdot \cos(0) = E \oint_{\Gamma} dl = E 2\pi r = -\frac{d(\pi r^2 B)}{dt} \quad (3)$$

da cui:

$$E 2\pi r = -\pi r^2 \frac{dB}{dt} \Rightarrow E = -\frac{r}{2} \frac{dB}{dt} = k \frac{dB}{dt} \quad (4)$$

dove k è un fattore geometrico.

Tutto ciò è applicabile anche nel caso del corpo umano in quanto esso è assimilabile ad un conduttore elettrico con una propria resistività elettrica che varia da tessuto a tessuto. È importante ricordare che, sia che vari il campo rispetto alla posizione dell'operatore o che vari la posizione dell'operatore rispetto al campo, si è sempre in presenza di un dB/dt ; quindi un operatore che si muove in un gradiente di campo B è soggetto ad un campo E proporzionale alla variazione di B nel tempo.

Sapendo che:

$$\frac{dB}{dt} = \frac{\partial B}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial B}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial B}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial t}, \quad (5)$$

dove, ad esempio, dB/dz è il gradiente dell'intensità di induzione magnetica B lungo la direzione z dello spazio e dz/dt è la velocità di spostamento lungo la direzione z , allora la (4) si può semplificare nel seguente modo:

$$E = k \left(\frac{\partial B}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial B}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial B}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial t} \right) = k \left(\frac{\partial B}{\partial x} \cdot v_x + \frac{\partial B}{\partial y} \cdot v_y + \frac{\partial B}{\partial z} \cdot v_z \right) \quad (6)$$

Quindi il campo elettrico E è esprimibile come somma dei gradienti di B nelle tre direzioni per le rispettive velocità di moto.

Infine la densità di corrente elettrica J si può calcolare come:

$$J = \sigma E \quad (7)$$

dove σ è la conducibilità elettrica espressa in S/m e J è la densità di corrente elettrica espressa in A/m² [5].

2.2 – SVILUPPO ED IMPLEMENTAZIONE DEL CODICE

Il codice implementato permette di eseguire le seguenti operazioni:

- 1) ricostruire la distribuzione delle linee di isocampo all'interno della sala magnete (piano x,z)
- 2) definire un percorso tipico effettuato dall'operatore all'interno della sala magnete, e quindi attraverso il gradiente spaziale di campo magnetico;
- 3) definire il profilo di velocità associato al percorso effettuato
- 4) stimare il campo elettrico E e la densità di corrente J indotti dal movimento mediante
 - a. l'equazione (6), che nel piano (x,z) si semplifica nel modo seguente:

$$E = k \left(\frac{\partial B}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial B}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial t} \right) = k \left(\frac{\partial B}{\partial x} \cdot v_x + \frac{\partial B}{\partial z} \cdot v_z \right) \quad (8)$$

- b. l'equazione (7), con $r = 64$ cm e $\sigma = 0.2$ S/m, in accordo a quanto definito da Hartwig e co-autori [5].

Per simulare una situazione maggiormente aderente alla realtà, si è supposto che l'andamento della velocità di cammino fosse non costante, ma con un profilo di tipo trapezoidale, ovvero lineare crescente nel primo tratto del percorso, costante e pari al valore massimo nel secondo tratto, ed infine linearmente decrescente nel terzo tratto fino al punto finale del percorso.

Il codice è stato validato per confronto con i dati di letteratura [5], aggiungendo poi alcune modifiche in termini di geometria di riferimento della sala magnete e di modellazione delle strutture su cui vengono calcolati il campo elettrico interno e la densità di corrente. In particolare, il nuovo codice è stato sviluppato sulla base della geometria della sala magnete dell'Istituto Nazionale Tumori - IRCCS "Fondazione G. Pascale", in previsione della successiva analisi sperimentale. Il magnete in dotazione è un MAGNETOM Symphony A Tim System da 1.5 T. Per il calcolo del campo B in ogni punto della sala nel piano xz, si è partiti dalla mappa delle linee di isocampo fornita dalla ditta costruttrice. La distribuzione del CMS nella sala è stata poi ricostruita approssimando le linee di isocampo ad ellissi ed i valori intermedi di B sono stati calcolati mediante interpolazione esponenziale a tratti; inoltre sono state prese in considerazione le linee di isocampo fino a 0.15 mT in quanto maggiormente approssimabili ad ellissi.

Per quanto riguarda il calcolo del campo elettrico e della densità di corrente indotti, in letteratura viene considerata una spira circolare di raggio r nel corpo umano e vengono utilizzate le equazioni (4) e (7) con r pari a 64 cm e σ pari a 0.2 S/m, ossia la conducibilità elettrica media dei tessuti umani. Per rendere il calcolo maggiormente realistico, nel nuovo codice si è pensato di considerare la massima sezione perpendicolare al campo magnetico di un corpo ellittico e non sferico, e quindi una spira ellittica di semiasse maggiore a e semiasse minore b; il campo elettrico e la densità di corrente indotti in questo caso si possono calcolare nel modo seguente[6]:

$$E = -\frac{a^2b}{a^2+b^2} \frac{dB}{dt} = k \frac{dB}{dt} \quad (9)$$

$$J = \sigma E = -\frac{a^2b}{a^2+b^2} \sigma \frac{dB}{dt} = k\sigma \frac{dB}{dt} \quad (10)$$

La scelta degli assi da considerare dipende dall'orientazione del soggetto nel campo: per un soggetto in piedi in prossimità del tomografo, a è lungo la direzione testa-piedi e b lungo la direzione destra-sinistra.

2.3 - INTERFACCIA GRAFICA

Una volta implementato il codice, è stata sviluppata una interfaccia grafica o GUI (Graphic User Interface), in modo da rendere l'utilizzo più intuitivo e semplice attraverso l'uso di controlli user-friendly come pulsanti, menu a scorrimento, caselle di testo, permettendo all'utente di scegliere il percorso ed altre impostazioni. L'interfaccia grafica permette di utilizzare il codice senza dover conoscere le

istruzioni da inserire nel Command Window di MATLAB, oppure quali devono essere i parametri di ingresso e di uscita delle funzioni. Attraverso le finestre della GUI, l'utente può inserire le informazioni necessarie per poter calcolare le quantità dosimetriche di interesse (Figura 1):

- la velocità massima di cammino (o velocità di crociera) espressa in cm/s
- la tipologia movimento, scegliendo tra le opzioni "lento" e "veloce".
- la traiettoria percorsa dall'operatore, che può essere selezionata manualmente sulla mappa 2D delle curve di isocampo generata dal codice, oppure indicando le coordinate punto iniziale e punto finale.
- la parte del corpo in cui verranno calcolati il campo elettrico e la densità di corrente, scegliendo tra le opzioni "corpo", "testa" o "arti superiori". Per semplicità si considera lo stesso gradiente spaziale di induzione magnetica all'altezza del centro di massa di un adulto in tutti e tre i casi ma, per una maggiore accuratezza, nel caso della testa si dovrebbe considerare il gradiente spaziale ad un' altezza maggiore. Per quanto riguarda la conducibilità elettrica σ dei tessuti, i valori sono stati estrapolati dal modello parametrico per il calcolo delle proprietà dielettriche dei tessuti biologici sviluppato da C. Gabriel [7]. Poiché le frequenze associate ai movimenti naturali del corpo sono estremamente basse, al di sotto di 1 Hz, sono state considerate le conducibilità dei tessuti alla frequenza più bassa disponibile, ossia a 10 Hz. Una volta note le conducibilità dei tessuti costituenti il modello tridimensionale, è stata calcolata una conducibilità media per il corpo, per la testa e per gli arti superiori andando a considerare solamente le conducibilità dei tessuti che li compongono rispettivamente. Le conducibilità medie ottenute sono 0.26 S/m per il corpo, 0.24 S/m per la testa e 0.20 S/m per gli arti superiori; tali valori sono in accordo con il valore della conducibilità media del corpo (0.20 S/m) indicata nelle linee guida ICNIRP del 1998 [8].

Una volta fissate le informazioni preliminari, è possibile avviare il calcolo del campo elettrico e della densità di corrente indotti dal movimento simulato. Il codice fornisce in uscita l'andamento delle due grandezze dosimetriche calcolate (E e J), della velocità e del campo di induzione magnetica lungo il percorso preselezionato ed, in una finestra ulteriore, il grafico di dB/dt.

The figure shows a MATLAB GUI with four distinct input sections:

- Velocità massima:** A text input field containing the value '160' followed by the unit 'cm/s'.
- Selezione tipologia movimento:** A dropdown menu with 'lento' selected, and 'veloce' listed below it.
- Selezione percorso:** A dropdown menu with 'Manualmente (su mappa 2D)' selected, and 'Indicando coordinate punto iniziale e punto finale' listed below it.
- Selezione zona corpo:** A dropdown menu with 'Corpo' selected, and 'Testa' and 'Artisuperiori' listed below it.

Figura 1: Interfaccia grafica associata al codice di calcolo per l'inserimento dei dati di input della simulazione

3 – RISULTATI

Il codice di calcolo può essere utilizzato per stimare le condizioni di esposizione di un lavoratore MRI, all'interno di una sala MRI con caratteristiche note, simulando diverse situazioni in cui l'operatore è in movimento all'interno della sala, ovvero nello spazio in cui è presente un gradiente spaziale di CMS.

Si consideri la traiettoria definita in **Figura 2**. La figura riporta la distribuzione del campo di induzione magnetica per un sistema MRI da 1.5 T. L'induzione magnetica è massima al centro del bore, nella zona dove viene posizionato il paziente, e decresce rapidamente man mano che ci si allontana dallo scanner. La traiettoria indicata dalla freccia rossa indica il movimento di un operatore che entra nella sala e si avvicina allo scanner MRI. Tale movimento è molto comune, ad esempio, per un tecnico sanitario di radiologia medica, che svolge le funzioni di accompagnamento e posizionamento del paziente prima e dopo l'esame clinico, o entra nella sala anche durante l'esame in caso di procedure particolari.

Per considerare l'effetto del movimento sull'entità delle grandezze indotte, si considerino i due profili di velocità indicati in **Figura 3**. Per la velocità si è assunto un profilo trapezoidale, ovvero caratterizzato da un tratto iniziale in cui la velocità aumenta linearmente, un secondo tratto in cui la velocità è costante (velocità di crociera), ed un tratto finale in cui la velocità decresce linearmente. Nei due casi in **Figura 3**, la velocità di crociera è la stessa (140 cm/s), mentre variano le pendenze del tratto finale e di quello iniziale. Nel caso di un movimento lento (**Figura 3a**), la lunghezza del primo e del terzo tratto è pari ad un terzo della lunghezza totale del percorso, mentre nel caso di un movimento veloce (**Figura 3b**), la lunghezza degli stessi tratti sarà pari ad un quarto della lunghezza totale. In questo modo si è cercato di simulare due tipologie di movimento dove si hanno una accelerazione iniziale ed una decelerazione finale differenti.

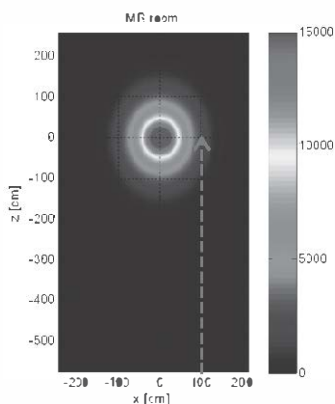


Figura 2: Distribuzione del campo di induzione magnetica per un sistema MRI da 1.5 T

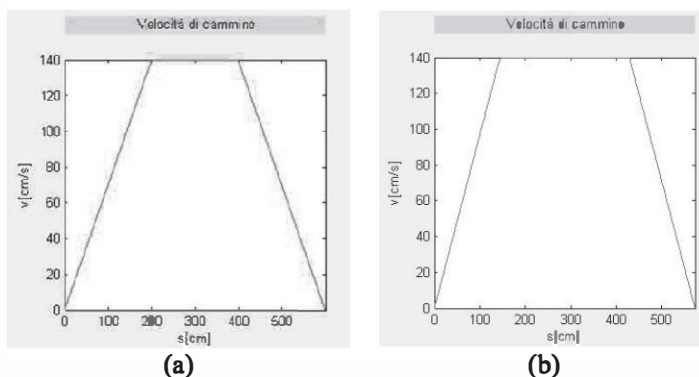


Figura 3: Profili di velocità lento (a) e veloce (b) associati alla traiettoria riportata in Figura 2

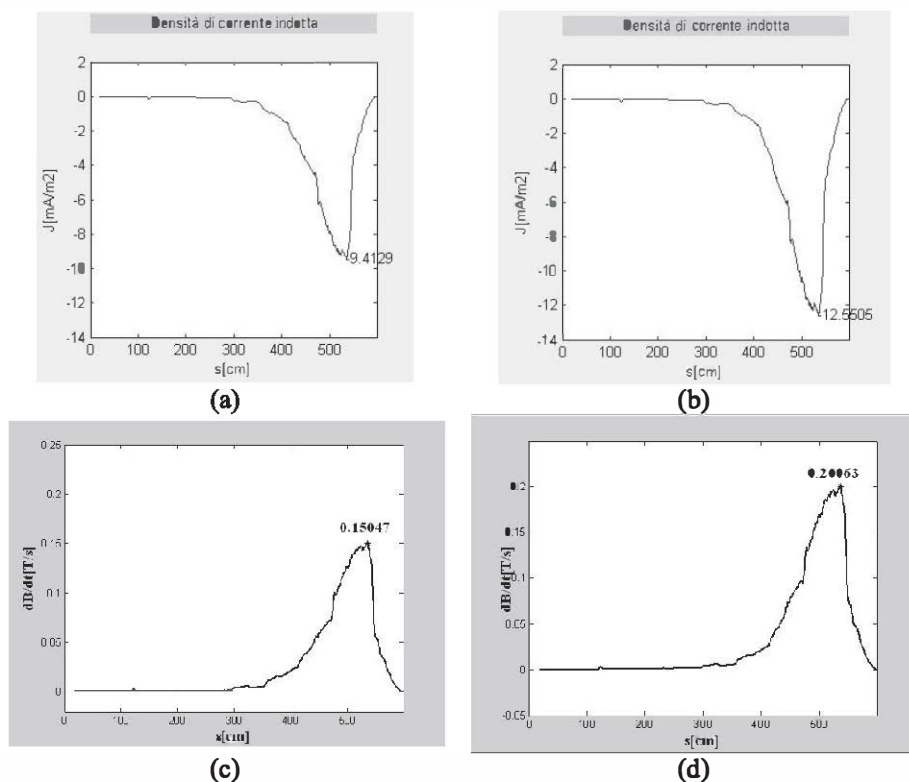


Figura 4 Andamento della densità di corrente indotta e del dB/dt nel corpo umano associati ad un movimento lento (a, c) e veloce (b, d).

I risultati dei due casi di movimento sono riportati in **Figura 4** in termini di grandezze elettromagnetiche indotte. In particolare, la figura riporta l'andamento della densità di corrente e della variazione temporale di campo magnetico nel caso lento (**Figura 4a e 4c**) e nel caso veloce (**Figura 4b e 4d**). Come si può osservare, le

grandezze indotte risultano maggiori nel caso in cui la traiettoria considerata viene percorsa con un movimento più veloce. Avendo impostato, per i profili di velocità, lo stesso valore di velocità di crociera, si può dire che il parametro di movimento che influenza maggiormente il risultato finale è l'accelerazione/decelerazione dei tratti iniziale e finale.

4 – DISCUSSIONE

Dall'analisi numerica qui condotta si possono fare alcune considerazioni importanti dal punto di vista della protezione dei lavoratori. In particolare, il risultato più interessante è che per ridurre il campo elettrico interno e la densità di corrente elettrica indotti all'interno del corpo del soggetto in movimento, occorre ridurre i gradienti di velocità, ossia le accelerazioni e decelerazioni durante i movimenti, e aumentare il tempo impiegato (o ugualmente lo spazio percorso) per raggiungere la velocità di crociera, piuttosto che ridurre il valore della velocità di crociera stessa.

Dai risultati riportati nella letteratura scientifica non è possibile, ad oggi, fornire considerazioni conclusive circa l'induzione di effetti a lungo termine sulla salute derivanti dall'esposizione al campo magnetico statico. Nonostante ciò, la tendenza comune è di assumere un atteggiamento conforme al principio di precauzione, cercando di assumere comportamenti tali da minimizzare l'esposizione.

Per raggiungere tale obiettivo è importante seguire degli accorgimenti che dovrebbero entrare a far parte della quotidianità degli operatori sanitari durante i turni di lavoro, anche per ottemperare a precisi obblighi di legge. Ad esempio, in riferimento al caso esaminato, è importante che il tecnico rimanga il minor tempo possibile all'interno della sala magnete, che mantenga la maggiore distanza possibile dal magnete, compatibilmente con le attività da svolgere, e che effettui tutte le operazioni di centratura del paziente e di posizionamento delle bobine distendendo al massimo le braccia, in modo da allontanare la testa e il tronco dal centro del magnete a scapito degli arti.

Seguire tali accorgimenti può ridurre il livello di rischio ma potrebbe non essere sufficiente; per tale motivo si sta sviluppando l'utilizzo di dispositivi che monitorano l'intensità di campo magnetico al quale l'operatore è esposto costantemente, per tutta la durata del turno lavorativo.

L'utilizzo di un sistema di rilevazione "portatile" e "personale" del campo magnetico statico risulta un mezzo efficace per assicurare all'operatore il monitoraggio continuo dell'esposizione al campo e il non superamento delle soglie previste dalla legge ma non permette di valutare il superamento delle soglie di altre grandezze indicate dalle normative, come il campo elettrico interno e la densità di corrente indotti nel corpo del soggetto in moto in un gradiente spaziale di campo magnetico. Il codice sviluppato nell'ambito del progetto suggerisce un possibile approccio nella direzione di una più accurata caratterizzazione dell'esposizione occupazionale in MRI.

Tale codice di simulazione potrebbe avere diverse applicazioni, ad esempio:

- nella educazione alla sicurezza dei lavoratori, al fine di prepararli ed addestrarli su come evitare esposizioni elevate e come modificare opportunamente il loro comportamento all'interno della sala magnete;

- nella valutazione della correlazione tra i livelli di campo elettrico e densità di corrente indotti nel corpo umano e gli effetti sensoriali ed altri disturbi che vengono segnalati dal personale di risonanza magnetica;
- nella valutazione di eventuali effetti genotossici a seguito della esposizione professionale, in quanto, conoscendo i livelli di campo elettrico e densità di corrente indotti, è possibile riprodurre in laboratorio le stesse condizioni di esposizione a cui sono sottoposti gli operatori.

BIBLIOGRAFIA

1. Direttiva 2013/35/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio, del 26 giugno 2013, sulle disposizioni minime di sicurezza e di salute relative all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici (campi elettromagnetici) (ventesima direttiva particolare ai sensi dell'articolo 16, paragrafo 1, della direttiva 89/391/CEE) e che abroga la direttiva 2004/40/CE. G.U. UE L179 del 29 giugno 2013.
2. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) (2009). Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields. *Health Physics*, 96:504-514.
3. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) (2010). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). *Health Physics*, 99:818-836; 2010.
4. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, "ICNIRP GUIDELINES for limiting exposure to electric fields induced by movement of the human body in a static magnetic field and by time-varying magnetic fields below 1 Hz," *Health Physics*, vol. 106(3), pp. 418-425, 2014.
5. Hartwig V, Vanello N, Giovannetti G, Lombardi M, Landini L, Santarelli MF, A novel tool for estimation of magnetic resonance occupational exposure to spatially varying magnetic fields. *Magnetic Resonance Materials in Physics, Biology and Medicine*, 24(6), 323-330, 2011.
6. McRobbie D, Foster MA. Pulsed magnetic field exposure during pregnancy and implications for NMR foetal imaging: a study with mice. *Magnetic resonance imaging*, 3(3), 231-234, 1985
7. Gabriel C, Compilation of the Dielectric Properties of Body Tissues at RF and Microwave Frequencies., King's Coll London (United Kingdom) Dept of Physics, 1996.
8. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (Up to 300 GHz). *Health Phys.* 1998; 74: 494-522, 1998.

INDICAZIONI OPERATIVE PER LA GESTIONE IN SICUREZZA DEI TOMOGRAFI NMR UTILIZZATI NELLA RICERCA SCIENTIFICA

Massimo Mattozzi, Francesco Campanella

INAIL – Dipartimento di Medicina Epidemiologia Igiene del Lavoro ed Ambientale

1 - INTRODUZIONE

La Risonanza Magnetica, prima di trovare ampie applicazioni in medicina, è stata largamente utilizzata nell'ambito della ricerca scientifica, in particolare quella orientata all'analisi chimica delle molecole organiche e delle macromolecole biologiche, la cui struttura complessa trova codifica principalmente attraverso l'interpretazione degli spettri NMR, fra l'altro ottenibili mediante indagini per lo più dirette, che cioè non necessitano di pre-trattamenti, e che, come tali, hanno l'indubbio vantaggio di configurarsi come "non distruttive".

Per quanto sopra, molteplici sono le applicazioni in chimica farmaceutica, come ad esempio lo studio della relazione tra la struttura molecolare delle specialità farmaceutiche e la loro attività biologica, in particolare nei farmaci capaci di interagire nei confronti di recettori biomolecolari umani; in questi casi la tecnica NMR consente infatti di investigare circa la reale capacità d'azione della molecola studiata, permettendo di dare maggiore incisività allo studio di nuove strutture molecolari da destinare all'utilizzo farmacologico.

Dalle prime applicazioni dell'NMR, che erano correlate al solo nucleo di idrogeno, si è passati nel tempo ad indagare un più ampio numero di nuclei magneticamente attivi, evolvendo così verso metodiche sempre più sofisticate e raffinate, capaci di effettuare indagini sempre più complesse e minuziose, ottenendo informazioni che, correlate tra loro, consentono di dare indicazioni strutturali in più dimensioni, anche in relazione a strutture di molecole molto complesse. Tuttavia, nonostante questa premessa, mentre l'utilizzo a scopo medico della Risonanza Magnetica (RM) è codificato da un quadro normativo specifico che è in vigore da più di venticinque anni, e la gestione della sicurezza relativamente all'uso per finalità mediche della tomografia RM deve conformarsi al rispetto degli standard di sicurezza di cui all'art.2 del DPR 542/94, ovvero agli allegati tecnici n.1 e n.4 del D.M. 2/8/1991, ulteriormente ribaditi e circostanziati dalle "Indicazioni operative" dell'ISPESL pubblicate nel 2004, niente di specifico esiste per le applicazioni non mediche. Tale carenza "storica" si è ormai trasformata in una lacuna stabile nella pratica quotidiana alla luce del fatto che le attuali tecnologie offerte dal mercato si spingono alla costruzione di apparecchiature caratterizzate da elevatissimi livelli di campo

magnetico statico, la cui gestione in sicurezza non può non essere circostanziata da un sistema che sia standardizzato secondo specifici criteri.

Quanto sopra è ancor più vero, ed assume ancor più critica valenza, nel momento in cui si riflette sul fatto che in questo caso, gli utilizzatori dell'apparecchiatura sono soprattutto nelle Università, dove gli spettrometri NMR sono maggiormente diffusi, e sono soprattutto utilizzati da studenti, specializzandi, borsisti e contrattisti, ovvero categorie non configurabili come lavoratori dipendenti ma piuttosto come "utilizzatori scientifici", a volte anche occasionali, spesso molto competenti nell'applicazione "scientifica" della tecnica, ma generalmente poco sensibili agli aspetti di sicurezza, perché ignari dei rischi associati non essendo stati il più delle volte debitamente formati e sensibilizzati su questi importanti aspetti. Coloro che hanno maggiore familiarità con la situazione operativa di cui trattasi, potrebbero erroneamente pensare che l'utilizzo di spettrometri NMR comporti oggi una minore esposizione per gli operatori, poiché l'introduzione dei campioni – una volta installato il "probe" – avviene generalmente per tempi molto più brevi che nelle altre applicazioni, e, addirittura, nei sistemi dedicati ad analisi in serie, ciò avviene anche attraverso l'utilizzo di sistemi automatizzati composti da carosello e braccio robotizzato. Tuttavia, per le indagini NMR, si aggiunge un ulteriore livello di esposizione non rintracciabile negli altri casi, e correlato al processo di regolazione del tuning che, nella maggior parte dei casi, deve necessariamente essere effettuato ponendosi al di sotto dell'apparecchiatura. In tali condizioni operative, dovendo regolare di fatto il tuning per ogni tipologia di campione introdotto (a meno di ripetizione di analisi su medesime tipologie di campioni), il tempo di permanenza a livelli elevati di campo magnetico statico rappresenta un fattore decisamente significativo, e molto importante a livello protezionistico. Nella maggior parte dei casi, la postazione di lavoro degli operatori, la zona di comandi delle apparecchiature ed il laboratorio chimico atto alla preparazione dei campioni si trovano nello stesso unico ambiente ove è installato lo spettrometro NMR o nelle immediate vicinanze. Questa è una condizione che merita senz'altro ampi e specifici approfondimenti a proposito delle problematiche di sicurezza. Essa testimonia come, di fatto, l'evoluzione tecnologica e scientifica delle applicazioni NMR in questi anni non sia purtroppo andata di pari passo con la garanzia della sicurezza. Questa considerazione è di per sé facilmente confermabile osservando come la maggior parte degli spettrometri installati in Italia, anche se di ultima generazione, rispondono spesso alle stesse caratteristiche di gestione che contraddistinguevano le installazioni di trenta anni fa, le quali presentavano peraltro livelli di rischio complessivo notevolmente inferiori a quelli attuali. Il risultato finale è quindi una scarsa sensibilità verso la sicurezza, rinforzata purtroppo dalla mancanza di uno specifico quadro normativo di riferimento: ciò rende necessario e non più differibile provare a codificare anche questi ulteriori scenari di utilizzo applicativo della Risonanza Magnetica, e quindi proporre delle prime indicazioni operative che possano essere utili per la valutazione e la minimizzazione del rischio, fermo restando il doveroso rispetto del D.Lgs.81/2008, nel quale si fa riferimento alla Direttiva Europea 40/2004 in materia di esposizione a campi elettromagnetici, la cui entrata in vigore è stata procrastinata al 2012, "congelando" di fatto i limiti di esposizione in essa definiti.

Scopo delle presenti indicazioni, redatte sulla base di una lunga esperienza nel mondo della Risonanza Magnetica a scopo medico, è quello di dare uno strumento operativo, chiaro e sintetico per ottimizzare la sicurezza di un Laboratorio NMR, nella volontà di sistematizzare la gestione della sicurezza alla stessa stregua del livello di attenzione nelle installazioni di tipo medico presenti in Italia. Trattandosi di prime indicazioni, non si ha nessuna presunzione di esaustività, ma si vuole unicamente iniziare un percorso da condividere con la comunità scientifica di settore migliorandola eventualmente con il contributo di chi mostrerà maggiore sensibilità in merito.

2 – LA SPETTROMENTRIA NM

2.1 DESCRIZIONE DI UNO SPETTROMETRO NMR

Uno spettrometro NMR si compone di un avvolgimento superconduttore immerso in una camicia di elio a sua volta attornita da una camicia di azoto. I due gas sono introdotti all'interno delle rispettive camicie attraverso le torrette poste sulla testa del magnete, che possono variare nel numero secondo gli spettrometri, dei contenuti di gas liquefatti all'interno e delle scelte costruttive delle case produttrici. In genere le torrette più piccole sono dell'azoto e quella più grandi dell'elio. L'utilizzo dell'Azoto Liquido è necessario al fine abbassare il gradiente termico della camicia del dewar contenete l'Elio liquido e quindi di diminuirne l'evaporazione; ovviamente il consumo di azoto è maggiore di quello dell'elio (~10 volte). Al centro dello spettrometro si ha il cilindro vuoto, denominato "*bore*", ove è presente il campo statico ed è possibile far scorrere il *probe*, una sorta di "contenitore cilindrico" ove all'interno viene alloggiato il campione da analizzare. Secondo il tipo di esperimento si usano diversi probe, che possono essere selettivi per il tipo di nucleo da investigare o multinucleari per analizzare un ampio spettro di nuclei. I probe si differenziano in base al numero e al tipo di bobina interna in dotazione, che ne individua la specificità.

2.2 LE ATTUALI APPLICAZIONI DELLA TECNICA NMR

La spettroscopia NMR si è affermata in questi ultimi anni come la tecnica più potente e veloce per l'identificazione di prodotti di reazione o di composti organici incogniti. Questa tecnica di analisi è diffusa non solo nei laboratori universitari, ma anche in quelli privati e nell'industria, in quanto, nonostante i costi siano molto più elevati rispetto ad altre tecniche analitiche, le capacità di esame e di accoppiamento dei risultati ad altre tecniche analitiche (anche considerando il suo carattere di tecnica non distruttiva), sono spesso decisive per esaminare sostanze molto complesse, soprattutto a carattere organico – biologico. In quest' caso, infatti, essa consente lo studio, oltre della composizione chimica e dell'ordine di sequenza dei diversi gruppi funzionali, della struttura tridimensionale della macromolecola investigata (come nel caso delle proteine). Questa capacità ricostruttiva consente per esempio di progettare "a tavolino" farmaci di sintesi aventi caratteristiche d'interazione con il sito recettore di una determinata macromolecola biologica già

decifrata con l'NMR, in grado di interagire con esso sostituendosi al suo specifico ligando naturale, con la finalità di produrre nell'organismo la stessa risposta biologica che, in assenza del farmaco, risulta essere in condizioni di deficienza. Oggi è possibile progettare farmaci di sintesi specifici e verificarne l'efficacia utilizzando la tecnica NMR, da sola o in abbinamento con altre. Oltre a quella citata, che rappresenta un'applicazione di eccellenza, le grandi potenzialità della tecnica hanno trovato riscontro in una miriade di altre tipologie di analisi, che nonostante i costi generalmente molto elevati, suscita l'interesse di tutta la comunità scientifica impegnata, non solo in ambito chimico, biologico e farmaceutico, ma anche a livello industriale, con una crescita costante.

Un altro importante utilizzo è quello legato alla ricerca delle sofisticazioni alimentari, quindi alla necessità di effettuare l'analisi del vino, dell'olio e di molti altri prodotti naturali, di cui si vuole verificare la reale qualità, l'eventuale edulcorazione e/o lo stato di conservazione. La tecnica ha il vantaggio, come per le applicazioni nell'imaging, di essere "non distruttiva", di richiedere piccolissimi quantitativi di campione, e, nella maggior parte dei casi, di non richiedere separazioni e/o trattamenti preliminari. Il campione è esaminato senza alterarne le caratteristiche, e l'unico limite è che abbia dimensioni compatibili con il probe dell'apparecchiatura, in genere caratterizzato da un diametro di pochi centimetri.

2.3 LE APPARECCHIATURE NMR INSTALLATE IN ITALIA E L'ATTUALE LIVELLO DI SICUREZZA

Nella Spettrometria NMR bisogna distinguere due tipi d'installazioni: quelle più datate, tuttora in funzione, e quelle di generazione più recente. Le installazioni più vecchie presenti in Italia sono per lo più spettrometri da 200 – 300 MHz (cui si associano campi statici da 4.7 e 7 tesla), con contenuti di Elio liquido pari a diverse decine di litri. Le apparecchiature di nuova generazione vanno invece mediamente da 400 a 600 MHz, con alcune che possono arrivare anche fino 900 MHz (21 tesla), e contengono diverse centinaia di litri di elio. I contenuti di Elio all'interno delle apparecchiature NMR di ricerca vanno mediamente, secondo le case costruttrici e delle caratteristiche legate al modello, dai 35 litri, per gli spettrometri più piccoli, fino ad oltre 1300 litri per i più grandi. Queste differenze spingono sempre di più affinché si giunga in tempi brevi alla definizione di un *sistema organizzato di gestione della sicurezza*, che tenga conto sia di procedure operative sia di limitazioni all'accesso nelle zone di rischio interessate alla presenza di valori significativi del campo magnetico statico, mettendo così fine ad una storica "lacuna" caratterizzata dall'assenza di normativa specifica che possa compendiare in modo più puntuale quanto sancito, a livello generale, dal D.Lgs.81/2008.

Fermo restando quanto sopra esposto, in molte installazioni, soprattutto nelle più datate, si rileva uno scarso riferimento alle preziose indicazioni date dai costruttori degli spettrometri, in merito alla gestione della sicurezza, puntualmente riportate all'interno dei libretti d'istruzione che accompagnano le apparecchiature, e che, troppo spesso, vengono del tutto ignorate. Nelle strumentazioni più recenti i costruttori prevedono, all'interno dei libretti d'istruzione, capitoli interi relativi all'organizzazione di un sistema di sicurezza per ogni singola tipologia d'installazione, proponendo una valutazione del rischio e una sua modalità di

gestione che, se opportunamente messa in atto, rappresenterebbe già un risultato più che confortante. A conferma di ciò, è opportuno evidenziare come, per i moderni spettrometri, caratterizzati da elevati contenuti di elio, sono sempre previste condizioni di esercizio simili a quelle tipiche delle apparecchiature utilizzate a scopo medico nell'imaging. In esse sono previste delle tubazioni dedicate per l'evacuazione dei gas criogenici, dei sensori ossigeno per il rilievo delle loro eventuali fuoriuscite nell'ambiente, nonché un sistema di ricambio d'aria in condizione normale e di emergenza, in grado di evacuare all'esterno la dispersione aerea dei criogeni che avviene sia fisiologicamente (processo denominato "boil – off") che in casi di anomalia di funzionamento (in particolare per l'elio il fenomeno prende il nome di "quench"). Inoltre, è prevista l'individuazione e il confinamento della zona di rischio fino a 5 gauss, entro la quale non devono essere previste postazioni di lavoro, attività di laboratorio, o anche la permanenza del personale autorizzato oltre il tempo necessario a svolgere le operazioni necessarie per il funzionamento e la messa a punto della apparecchiatura per l'ambito applicativo di cui trattasi (es: operazioni di introduzione del campione, di tuning, di refilling dei criogeni, etc.). In particolare si rileva che le operazioni d'introduzione del campione sono effettuate sulla sommità delle apparecchiature, al fine di calare all'interno del magnete il probe contenente il campione da investigare. In tale posizione l'operatore può trovarsi all'interno di un valore di campo magnetico di notevole intensità, dove è necessaria una valutazione del rischio alla luce dei disposti del D.Lgs.81/2008.

Generalmente le apparecchiature hanno almeno due o più prolungamenti verticali in estensione verso l'alto: uno destinato al refilling dell'azoto, ed un'altro per le operazioni di refilling dell'Elio, con associata almeno una valvola "a tappo" per il quench (in figura). Le piccole e medie apparecchiature NMR, di costruzione non recente, non sono generalmente dotate dei sistemi di sicurezza tipici dei magneti superconduttori impiegati per l'imaging medico, come, ad esempio, la tubazione di quench, per convogliare l'Elio all'esterno della sala, i dispositivi di sicurezza accessori (sensore ossigeno), o l'impianto di ventilazione per l'espulsione dell'aria contenente l'elio gassoso eventualmente fuoriuscito all'interno del laboratorio. A tal riguardo, il dato più preoccupante è che il sistema complessivo di sicurezza "sensore ossigeno + ventilazione di emergenza" non è quasi mai presente neanche in quelle installazioni nelle quali, non essendovi le tubazioni di quench, in caso di evento accidentale, tutto l'Elio si espanderebbe liberamente all'interno del Laboratorio NMR creando delle oggettive situazioni di rischio. I libretti d'istruzione delle apparecchiature NMR prevedono diverse soluzioni per la gestione dei quench, ma l'adozione di tubazioni "dedicate" al convogliamento delle condense all'esterno è la soluzione che appare notevolmente preferibile, soprattutto nel caso di quantità di elio importante, come quelli delle apparecchiature di ultima generazione i cui contenuti sono di centinaia di litri.

2.4 LE INDICAZIONI OPERATIVE PER LA GESTIONE DELLA SICUREZZA

Oltre alla totale assenza di un quadro normativo tecnico di riferimento, va anche rilevato come, a differenza delle applicazioni della risonanza magnetica in medicina, non esista neanche un apparato autorizzativo che, di fatto, possa richiedere all'utenza una preliminare valutazione del rischio.

Non è detto che tale situazione debba rimanere immutata, ma nel frattempo è intenzione della Sezione Tecnico Scientifica di Supporto Tecnico al SSN in materia di Radiazioni del Dipartimento di Medicina Epidemiologia Igiene ed Ambientale dell'INAIL, avente lunga tradizione nella gestione del rischio nell'imaging medico con RM, proporre un modello di riferimento che consenta la messa in sicurezza degli ambienti, e la garanzia dell'incolumità per tutti gli operatori coinvolti. Quanto segue è quindi da intendersi quale elemento di proposta (1) eventualmente adottabile dai laboratori di ricerca interessati.

3 – IL RESPONSABILE DELL'IMPIANTO EPROCEDURE DI UTILIZZO IN AMBITO NMR (RIPU)

Il **RIPU** deve avere competenze ed esperienze professionali (comprovato da un dettagliato Curriculum Vitae) riguardo all'utilizzo della risonanza magnetica. Questa figura, designata dal datore di lavoro con formale lettera d'incarico, e relativa accettazione, ha delega nella standardizzazione delle procedure operative e gestionali legate all'uso dello spettrometro NMR, e corresponsabile, per quanto di sua pertinenza, con l'Esperto Responsabile nella Gestione degli Aspetti di Sicurezza (ERGAS), della valutazione e della gestione del rischio associati all'espletamento di tali procedure.

4 – L'ESPERTO RESPONSABILE PER LA GESTIONE DEGLI ASPETTI DI SICUREZZA (ERGAS)

L'**ERGAS**, designato dal datore di lavoro con formale lettera d'incarico, e relativa accettazione, è incaricato di elaborare, sentito il RIPU, un regolamento di sicurezza. In esso dovranno essere contenute tutte le procedure operative e gestionali del laboratorio NMR: dalla descrizione delle modalità di esecuzione delle analisi, ai compiti dei soggetti coinvolti nelle operazioni legate al funzionamento dell'apparecchiatura NMR, alle esplicite indicazioni per garantire il rispetto dei limiti di esposizione, vigenti in Italia, per i lavoratori addetti alle procedure da eseguire in caso incidente. L'**ERGAS** è chiamato a garantire aspetti e requisiti di sicurezza come previsti dagli allegati 1 e 4 del D.M. 2/8/1991, per le apparecchiature impiegate a scopo medico, ad esclusione, ovviamente, degli aspetti che riguardano la protezione del paziente. Egli deve curare e gestire, in modo particolare, gli aspetti inerenti i rischi connessi all'attività dell'impianto tramite il regolamento di sicurezza sopra citato, considerando il fatto che esso è, a giusto titolo, esportabile dal succitato D.M. 2/8/91. Sarebbe doveroso e opportuno, nonché omogeneo con l'impostazione sopra introdotta, che l'incarico venisse affidato a soggetti che, in virtù delle loro caratteristiche curriculari, avessero una pregressa esperienza in qualità di esperti responsabili per la sicurezza nell'ambito della RM utilizzata a scopo medico, o che testimoniassero comprovata competenza specifica relativamente alle problematiche connesse con la valutazione dell'esposizione ai rischi di pertinenza, eventualmente acquisita attraverso la partecipazione a corsi di formazione organizzati da associazioni scientifiche di settore o da Istituzioni pubbliche di rilievo, con

particolare riferimento a quelli organizzati nel passato dall'ISPESL e successivamente, a partire dal giugno 2010 in poi, dall'INAIL. Al fine di identificare i criteri, riguardo ai titoli di preferenza per l'acquisizione dell'incarico, sarebbe auspicabile, per analogia, utilizzare quelli – tuttora vigenti per l'ambito medico - di cui all'art.2 del D.M. 29/11/85 e agli allegati 2 e 6 del D.M. 2/8/1991. L'ERGAS è inoltre tenuto a conservare un registro contenente tutti i controlli di sicurezza nel tempo espletati.

5 – IL PERSONALE OPERANTE ALL'INTERNO DEL SITO RM

Ogni operatore deve essere preventivamente visitato dal medico competente affinché sia attestata, in maniera specifica, la sua idoneità sanitaria allo svolgimento delle mansioni assegnate che comportano l'esposizione ai campi magnetici dello spettrometro NMR. Tutto il personale classificato come "idoneo" deve essere inserito in apposito elenco, tenuto formalmente agli atti da parte del datore di lavoro e disponibile in copia presso il laboratorio NMR. Tale idoneità è rilasciata dal Medico Competente, e deve essere ribadita su scala almeno annuale su tutto il personale che, per giustificato motivo, è presente nell'elenco del personale autorizzato, ovvero legato allo svolgimento della propria mansione, e comporterà che solo il personale autorizzato potrà accedere all'interno del laboratorio e svolgere le operazioni connesse all'utilizzo dello spettrometro NMR per i tempi strettamente necessari richiesti. Nell'elenco del personale autorizzato vanno individuati nominativamente anche i non dipendenti che possono avere libera facoltà di accesso al laboratorio NMR: ricercatori, studenti, specializzandi, tecnici, personale addetto alle pulizie appartenenti a società esterne, etc.; tutti dovranno essere dotati comunque d'idoneità medica specifica allo svolgimento delle operazioni connesse all'esposizione ai rischi legati ai campi elettromagnetici presenti nel laboratorio NMR. Eventuali ingressi occasionali da parte di operatori e/o visitatori dovranno essere gestiti volta per volta attraverso un opportuno filtro degli accessi da parte del RIPU, o di suo delegato, o, in alternativa, dell'ERGAS. In nessun caso deve essere consentito il libero accesso di visitatori o di operatori "occasionalisti" senza un filtro iniziale che verifichi l'effettiva compatibilità del soggetto all'esposizione ai rischi presenti nel laboratorio NMR. A tale proposito deve essere predisposto un opportuno questionario di verifica delle possibili controindicazioni che riporti in calce sia la firma del soggetto dichiarante che del RIPU, o di suo delegato, o dell'ERGAS che ne ha vagliato l'opportunità di accesso. In tale documento va riportato anche il tempo effettivo di permanenza del soggetto all'interno del laboratorio, indicando gli orari di accesso e di uscita e/o il periodo temporale in cui sarà consentito l'accesso a seguito della verifica effettuata per lo svolgimento delle operazioni connesse alle attività da compiere nel laboratorio.

6 – CLASSIFICAZIONE DELLE ZONE DI RISCHIO

6.1 ZONA AD ACCESSO CONTROLLATO

Si definisce Zona Controllata quella in cui il campo disperso d'induzione magnetica è pari ad almeno 0,5 mT (5 G). In essa non deve essere mai possibile accedere liberamente, ma solo tramite un opportuno filtro degli accessi che consentono di entrare all'interno dell'intera sala che ospita lo spettrometro NMR, da dove è possibile poi liberamente entrare nelle zone di maggiore rischio. Pertanto i laboratori NMR dovranno essere dotati di barriere fisiche fisse per l'accesso, in altre parole porte liberamente apribili solo dall'interno (ad esempio con apertura a chiave, a comando elettromeccanico, a banda magnetica, a combinatore numerico, ad impronta digitale, etc.). Tutti gli accessi dovranno essere dotati di campanello/citofono e apposita cartellonistica indicativa dei rischi e della restrizione di accesso al solo personale autorizzato. Generalmente, ma non necessariamente, la zona controllata è contenuta all'interno del laboratorio NMR, e pertanto è il solo laboratorio a dover prevedere tale confinamento; tuttavia, in linea di principio, tale zona potrebbe estendersi anche fuori del laboratorio stesso e, in questa situazione, coinvolgere zone che dovranno certamente essere interdette al libero passaggio con ulteriori barriere fisiche fisse dotate di dispositivo di apertura e di possibile accesso al solo personale autorizzato nonché dotato d'idoneità medica specifica.

Eventuali ambienti esterni al laboratorio NMR interessati da significativi valori del campo magnetico statico devono essere opportunamente valutati dall'ERGAS al fine di prevederne la possibile destinazione d'uso e la corretta gestione in sicurezza. All'interno del laboratorio NMR, la linea di campo che individua i 5 gauss dovrà essere chiaramente indicata a terra al fine di dare un'indicazione operativa agli addetti ai lavori relativamente alla zona controllata. Tale area dovrà essere tenuta libera da ingombri e non potrà essere in alcun modo adibita ad attività di lavoro da espletarsi nel laboratorio. Nella zona ad accesso controllato dovrà essere valutato il rischio da campo statico nel rispetto del D.M. 02/08/1991 s.n., e da campo elettromagnetico indotto, nel rispetto del D.Lgs.81/2008.

6.2 ZONA DI RISPETTO

Si definisce Zona di rispetto l'area interessata da valori di campo disperso d'induzione magnetica, compresi tra 0,1 mT (1 G) e 0,5 mT (5 G).

Essa non necessariamente dovrà essere contenuta tutta all'interno del laboratorio NMR, ma è buona prassi che il suo perimetro sia indicato a terra sia all'interno del laboratorio sia all'esterno, al fine di prevederne il giusto grado di attenzione.

A differenza della zona ad accesso controllato, oltre alla segnalazione a terra, non dovrà essere previsto un opportuno confinamento, e nelle zone esterne al laboratorio interessate, occorrerà fare attenzione a non prevedere postazioni di lavoro fisse, specialmente di lavoratori non addetti all'NMR, installazioni di apparati meccanici o elettronici che possano interferire con lo spettrometro o risentire nel loro funzionamento del campo magnetico dello stesso.

Bisogna, inoltre, evitare che tali zone possano prevedere la presenza di persone in pianta stabile, ma eventualmente solo di passaggio.

Ferma restando la necessità di "mappare", anche visivamente, le zone di rischio intorno allo spettrometro, ai fini di un'eventuale emergenza, l'apparecchiatura dovrebbe essere posizionata in modo tale da lasciare libero un camminamento intorno ad essa: ciò significa che l'utilizzo di scale o dispositivi analoghi per

effettuare le operazioni previste sulla testa del magnete devono prevedere una procedura di loro rimozione al termine di ciascuna operazione, lasciando sempre libero lo spazio intorno al magnete.

7 - SISTEMI DI SICUREZZA

Nella progettazione di futuri Laboratori NMR è auspicabile che gli spettrometri siano installati facendo molta attenzione all'ubicazione dei locali da destinare a tale attività all'interno della struttura scientifica ospitante. Occorre innanzitutto tener conto della possibilità di:

1. avere sufficienti spazi per realizzare ambienti fisicamente separati tra Laboratorio NMR e postazioni di preparazione campioni, di console e di lavoro per il personale addetto;
2. avere un camminamento sempre libero intorno al magnete e sgombrato di materiali;
3. poter installare i sistemi di ventilazione del Laboratorio NMR con sistemi di mandata e ripresa collegati agevolmente all'esterno dell'edificio;
4. avere accesso, all'esterno dell'edificio e nei pressi del laboratorio NMR, ad un luogo remoto ove far sfociare le tubazioni di evacuazione dei gas criogenici sia nelle condizioni di normale boil-off che di quench dell'Elio;
5. evitare di realizzare i laboratori NMR in ambienti interrati o seminterrati privi di aperture con l'esterno; in tali casi gli impianti di ventilazione dovranno essere particolarmente curati e verificati periodicamente nell'efficienza.

Le dotazioni di sicurezza da prevedere per le apparecchiature NMR di tipo superconduttore devono essere dimensionate in base ai magneti e al loro contenuto di Elio ed Azoto. Per prima cosa bisogna verificare le indicazioni di sicurezza previste dal costruttore e contenute nel libretto di istruzioni dell'apparecchiatura; sulla base di queste successivamente, confrontandole con lo stato di fatto, riconsiderare i sistemi di sicurezza dimensionandoli e/o implementandoli in ragione delle caratteristiche delle macchine installate e degli scenari di incidente possibile in quella specifica realtà operativa.

All'interno degli spettrometri NMR sono presenti due criogeni in contenitori coassiali, separati da una camicia: l'Elio, più interno, a contatto della bobina e l'Azoto, più esterno, con lo scopo di ridurre il gradiente termico. Un fatto accidentale può generare la perdita di supercontinuità della bobina con un improvviso surriscaldamento e caduta del campo. Questo evento provoca la vaporizzazione dell'Elio che, essendo meno denso dell'aria si stratifica verso l'alto del laboratorio, mentre, nel caso di vaporizzazione dell'Azoto, essendo più pesante dell'Ossigeno, si stratifica verso il basso. Per questi motivi dovranno essere previsti sistemi separati di evacuazione dei gas. Nel caso specifico dell'Azoto il sistema di evacuazione dovrà, ovviamente, essere a livello del pavimento e a seconda del quantitativo il condotto di espulsione potrà essere dotato di un opportuno ventilatore di aspirazione da attivarsi automaticamente con un sensore ossigeno posto a 30 cm dal pavimento.

Tale sistema, previa valutazione dell'ERGAS, dovrà essere realizzato anche sulla base delle indicazioni date dal costruttore, ferma restando una propria valutazione del rischio eventualmente correlata anche alle condizioni al contorno, legati ad esempio alla difficoltà di evacuazione del gas per la particolare ubicazione del laboratorio (locale seminterrato, etc.). In assenza di indicazioni precise, vale la mediazione tra l'applicazione del principio di cautela e quello di buon senso relativo alle effettive condizioni di rischio nell'ipotesi relativa al massimo incidente ipotizzabile.

Per quanto concerne l'Elio, per il quale sussiste invece il rischio di quench, occorre senz'altro prendere come riferimento quanto contenuto nel DM 02/08/1991 per le apparecchiature RM a scopo medico, oltre a quanto contenuto nei libretti di istruzione delle singole apparecchiature per quelle che sono le indicazioni fornite dal costruttore.

Un buon *sistema di sicurezza* dovrà dotarsi in linea generale, e per qualunque tipologia d'installazione, dei seguenti elementi caratteristici:

1. **un sistema di ventilazione e condizionamento normale per l'ambiente**, per il quale si consigliano 6-8 V/h, finalizzato al non ristagno dell'aria e al mantenimento della temperatura del laboratorio NMR attestata a 22 ± 2 °C ed una umidità relativa inferiore al 60%, a meno di indicazioni diverse fornite sul libretto di istruzioni del costruttore dello spettrometro; ciò a garantire il benessere microclimatico delle persone presenti nel laboratorio durante l'orario di lavoro. Il sistema di ventilazione normale si rende inoltre necessario per il continuo boil-off dell'elio nelle apparecchiature NMR, che per tale motivo richiedono refilling periodici e molto ravvicinati, soprattutto per gli spettrometri di vecchia generazione. Il boil-off è tale che se il locale è chiuso e non viene areato per giorni, l'Elio potrebbe accumularsi in quantità tali da ridurre la soglia di ossigeno nell'aria anche di sotto alla soglia del 18% nel laboratorio, valore minimo per garantire un adeguato livello di respirabilità dell'aria. Tale soluzione di **"intervento attivo costante"** è sempre consigliato, per tutte le tipologie di installazione, e ritenuto migliore di qualsiasi altro sistema passivo, a meno di casi particolari le cui soluzioni alternative siano valutate ugualmente efficienti (come ad esempio i laboratori dotati di soffitti molto alti, con finestre/aperture a filo del soffitto, possibilmente apribili in automatico con l'attivarsi del sensore ossigeno). La distribuzione delle bocchette di mandata dell'aria nel laboratorio dovrà essere in antitesi alle bocchette di ripresa, che vanno poste sulla sommità del magnete e/o, quando possibile, sulla parete più vicina che volge all'esterno e, comunque, in punti opportunamente studiati e tali da permettere un lavaggio completo della sala nel percorso del flusso dell'aria dalla mandata verso la ripresa, evitando così di formare "sacche" di ristagno. L'impianto di ventilazione normale, insieme a quelli di emergenza, deve essere tenuto attivo ininterrottamente, quindi anche fuori dell'orario di lavoro. Ovviamente tutta l'aria in mandata dovrà essere filtrata e quella in ripresa dovrà prevedere uno sfogo diretto verso l'esterno per tutti gli impianti. La sala va tenuta in condizioni di leggera pressione, per non far entrare polvere nel laboratorio e consentire una migliore evacuazione dei criogeni nel fisiologico consumo ordinario.

2. **due sistemi di ventilazione di emergenza:**

- il primo, destinato ad evacuare le fuoriuscite di Elio dallo spettrometro in caso di quench, dovrà presentare delle bocchette di ripresa possibilmente disposte sulla sommità del magnete, a livello del soffitto, con il più breve percorso verso l'esterno (è consigliabile un'efficienza di almeno 18-22 ric/h). Tale impianto può essere realizzato in due modi:
 - a) affiancando al sistema ordinario di mandata/ripresa (6-8 ric/h) un sistema ausiliario di ulteriore mandata ed ulteriore estrazione con motori autonomi, in modo tale da raggiungere, compresa la ventilazione ordinaria, i 18-22 ric/h.
 - b) mettendo motori di mandata/ripresa a 2 velocità (quali i sistemi ad inverter); il primo con portata 6-8 ric/h e il secondo per arrivare ai 18-20 ric/h.

La condizione di emergenza deve prevedere una regolazione tra flusso in mandata e flusso in ripresa con un leggero sbilanciamento a favore della ripresa, affinché la depressione della sala favorisca il convogliamento dell'elio verso le bocchette di ripresa senza dispersioni nella sala. E' possibile prevedere sulla sommità del magnete una "cappa" di convogliamento dell'elio in una condotta di ripresa.

- il secondo, destinato all'evacuazione delle fuoriuscite dell'azoto, è da predisporre con le bocchette di ripresa in basso, quanto più a filo del pavimento. A seconda dei contenuti di azoto, occorre prevedere aperture (sistema passivo) e/o ventilatori (sistema attivo) in grado di convogliare l'azoto verso l'esterno. L'ausilio di ventilatori di tiraggio dell'aria è comunque sempre raccomandato in tutti i casi quale soluzione migliore (sono consigliabili 18-22 ric/h). Nei casi in cui sotto i magneti è prevista una cavità accessibile per agevolare le operazioni di tuning, l'azoto fuoriuscito tenderà a crearvi una sacca di ristagno, pertanto occorrerà prevedere, oltre alla tubazione già indicata a pavimento, un'ulteriore tubazione di evacuazione posta internamente a questa cavità. Gli stessi libretti di istruzione delle apparecchiature la suggeriscono definendola "essenziale", e raccomandando, in aggiunta, la necessità di un sensore ossigeno "dedicato" posizionato all'interno della stessa cavità. Nel caso in cui la tubazione sia realizzata con dei tratti in salita, dovrà essere garantita comunque l'efficienza del sistema con appropriati ventilatori di aspirazione. Anche in questo caso all'attivarsi della ripresa di emergenza in basso, deve attivarsi anche la mandata che, di fatto, può essere comune al sistema di ventilazione di emergenza posto in alto, in quanto la sua finalità è solo quella di avere il necessario apporto di aria esterna nell'ambiente della sala per facilitare l'azione di convogliamento dell'azoto verso l'esterno nella condotta dedicata. Anche qui la condizione di emergenza deve essere accompagnata da un leggero sbilanciamento della mandata a favore della ripresa, in garanzia che lo stato di depressione della sala permetta il convogliamento dell'azoto verso le bocchette/condotte di ripresa senza dispersioni nella sala.

In entrambe le condizioni di ventilazione del laboratorio – normale/emergenza - occorre sempre prevedere *ricambi d'aria effettivi* (aria in entrata \sim / = aria in uscita), considerando le condizioni di pressione nel normale esercizio e di depressione in emergenza soltanto come “leggeri sbilanciamenti” rispetto alla condizione di equilibrio.

Oltre ai sistemi di espulsione sopra introdotti, anche l'immissione di aria pulita dall'esterno è da ritenersi elemento da garantire imprescindibilmente in tutte le installazioni, al fine di garantire la salubrità degli ambienti nonché il benessere dei lavoratori.

Nel caso di una contestuale attivazione dei due sistemi di ventilazione di emergenza presenti, (cioè di mandata comune, di ripresa per l'elio e di ripresa per l'azoto,) la sala potrebbe trovarsi in una condizione di insufficiente ripresa a causa di un apporto di aria in mandata incapace di compensare entrambe le condizioni di ripresa attive contemporaneamente. Il riequilibrio delle pressioni potrà essere effettuato con l'apertura delle porte, che solo in questa particolare evenienza sarà consentito, in modo da facilitare l'aspirazione di tutte le bocchette di ripresa ristabilendo la corretta condizione di depressione all'interno del Laboratorio. Tale condizione eccezionale dovrebbe prevedere la possibilità, da parte dei due sensori ossigeno che si attivano contemporaneamente, di poter attivare a loro volta un sistema di allarme acustico/luminoso da predisporre all'esterno dell'accesso del Laboratorio che allerti gli ambienti circostanti della condizione di particolare emergenza in corso.

Tutti gli impianti di ventilazione dovranno essere certificati come installati alla “regola d'arte” ai sensi del DM n. 37 del 22.01.2008, in altre parole per gli stessi dovranno essere prodotti dalle ditte fornitrici/installatrici ai rispettivi committenti gli allegati tecnici obbligatori previsti per tale certificazione, che a sua volta saranno messi a disposizione dell'ERGAS per le valutazioni tecniche di merito relativamente al benessere che egli è tenuto a dare al datore di lavoro per l'utilizzo (in sicurezza) dello spettrometro NMR. Gli impianti dovranno essere verificati nella loro corretta funzionalità a garanzia delle portate d'aria richieste in tutte le condizioni operative, ogni 6 mesi.

3. **Due sensori ossigeno** per la rilevazione dell'eventuale depauperamento dell'ossigeno causa presenza dell'Elio e dell'Azoto gassosi che dovessero fuoriuscire dal magnete, con associati a ciascuno due livelli di intervento, un preallarme (19% O₂) ed un allarme (18% O₂): l'allarme deve attivare automaticamente una delle due ventilazioni di emergenza, a seconda del gas rilevato (ovvero del loro posizionamento).

→ Il sensore in alto rileverà l'elio e pertanto attiverà la mandata di emergenza comune + la ripresa di emergenza in alto

→ Il sensore in basso rileverà l'azoto e pertanto attiverà la mandata di emergenza comune + la ripresa di emergenza in basso

Secondo i libretti d'istruzione, il sensore destinato alla rilevazione dell'elio dovrà essere predisposto sopra l'apparecchiatura, sulla verticale della stessa in modo da rendere quanto più tempestiva la rilevazione di emergenza, mentre il

sensores destinato alla rilevazione dell'azoto deve invece essere predisposto a 30 cm dal pavimento del laboratorio NMR. Nel caso in cui la ventilazione normale per l'ambiente e quella di emergenza per l'elio siano realizzate attraverso due motori a due velocità, nel posizionamento del sensore ossigeno in alto occorre fare attenzione a posizionarlo di modo tale da non consentire al sistema di ripresa di sottrarre aria alla sua rilevazione; eventualmente, (da valutare a seconda dei casi,) si può posizionare il sensore tra lo spettrometro e il sistema di ripresa verso cui è diretta l'aria, in modo tale che questa investa il sensore lungo il suo flusso prima di essere convogliata all'esterno.

4. Nel caso sia presente la cavità accessibile sotto il magnete, occorre prevedere un terzo sensore ossigeno a 30 cm dal fondo della stessa, capace ancora di azionare in automatico la ventilazione di emergenza per l'azoto.

Tutti i sensori dovranno essere tarati secondo la norma tecnica di riferimento, la norma CEI EN 50104, che prevede una certificazione della taratura del sistema di rilevazione effettuata attraverso l'ausilio di bombole certificate a concentrazione nota di ossigeno. Prove di funzionamento potranno essere effettuate dall'ERGAS periodicamente attraverso un proprio protocollo operativo dei controlli, mentre la taratura dovrà essere ripetuta almeno ogni 6 mesi.

Gli elementi sensibili dei sensori dovranno essere sostituiti entro il termine del periodo di garanzia previsto dal costruttore o anche precedentemente se non dovesse garantire più una corretta rilevazione.

Nell'individuare il luogo dell'installazione dei sensori, occorre inoltre tener conto delle caratteristiche di compatibilità degli stessi con il campo statico presente nell'area di collocamento.

5. Una o più **tubazioni di evacuazione dell'elio gassoso**, realizzate per convogliare e disperdere i gas creatisi a seguito del Quench, devono essere posizionati esternamente in un luogo considerato sicuro in ragione sia dei quantitativi di elio in gioco, sia sulla base di quanto stabilito nei libretti di istruzione delle apparecchiature; i terminali dei tubi di quench dovranno essere realizzati in modo da non far entrare acqua piovana, dotati di retina antintrusione per i volatili, possibilmente a forma di U rovesciata e con l'attenzione che l'intorno degli stessi sia "sicuro" rispetto al passaggio di persone, presenza di finestre o prese d'aria. Le tubazioni dovranno essere dimensionate opportunamente sulla base della lunghezza e della tortuosità del percorso, prevedendo, se del caso, diametri crescenti per evitare eccessive perdite di carico. Le parti delle tubazioni che possono essere raggiungibili al tatto devono essere coibentate per evitare rischi di ustione se toccate durante le fasi di quench. Anche se, a differenza dell'Elio, l'Azoto non crea problemi di quenching, vi è la possibilità di poter dotare lo spettrometro di una tubazione dedicata per l'evacuazione direttamente all'esterno del gas. Pur non essendo questa soluzione una tradizione consolidata, una tubazione dedicata di evacuazione che eviti l'immissione nel laboratorio di azoto gassoso è una soluzione che appare come un'ottimizzazione di sicurezza senz'altro da prendere in considerazione e che in ogni caso varrebbe sempre la pena

prevedere. Per le nuove installazioni, soprattutto a contenuti maggiori di criogeno, sarebbe opportuna una predisposizione e una dotazione da prevedere già a corredo dello spettrometro in fase di installazione. Preme sottolineare che l'installazione di tubazioni di evacuazione dei gas criogenici dallo spettrometro direttamente all'esterno non preclude la realizzazione del sistema di sicurezza sensori ossigeno e ventilazione di emergenza all'interno dei laboratori che ospitano queste apparecchiature.

Tutte le tubazioni di evacuazione dei gas criogenici dovranno essere certificate come installate alla "regola d'arte" ai sensi del DM n. 37 del 22.01.2008, ovvero per le stesse dovranno essere prodotti dalle ditte fornitrici/installatrici ai rispettivi committenti gli allegati tecnici obbligatori previsti per tale certificazione, che saranno messi a disposizione dell'ERGAS per le valutazioni tecniche di merito relativamente al benessere che egli è tenuto a dare al datore di lavoro per l'utilizzo (in sicurezza) dello spettrometro NMR. In caso di assenza di una tubazione di quench, o nell'impossibilità di una sua realizzazione per quelle che sono le caratteristiche costruttive delle apparecchiature esistenti, già installate ed operanti da lungo tempo, occorre prevedere quantomeno dei **ventilatori di aspirazione e un sistema di aperture/ventilazione forzata di immissione aria di compensazione** opportunamente dimensionati, secondo le specifiche già circostanziate.

A seconda dell'altezza dei soffitti, soprattutto per quelli più bassi, è consigliabile installare delle cappe di aspirazione, da predisporre al di sopra della testa dello spettrometro, capaci di convogliare direttamente nella condotta di aspirazione – e verso l'esterno - l'Elio gassoso, al fine di evitare la dispersione del gas nel laboratorio, e la sua successiva stratificazione progressiva dal soffitto verso il basso.

In caso di soffitti alti, ed in assenza sia di cappe, sia di tubazione di quench dedicata, è consigliabile predisporre dei ventilatori di aspirazione sopra lo spettrometro e/o a parete, se vicina, alla massima altezza del soffitto, che convogliano all'esterno l'aria della sala, eventualmente anche attraverso delle condotte esterne all'uopo predisposte che vadano a sfogare in luogo remoto, lì ove non si rischi, da un lato alcun rientro di elio da eventuali finestre e/o prese d'aria, dall'altro di interagire pericolosamente con zone a potenziale passaggio di pubblico.

Una soluzione, già adottata in alcuni laboratori italiani, è quella di far aprire in automatico, tramite sensore ossigeno, le finestre prossimali al soffitto. Tale soluzione, piuttosto complessa e onerosa, oltre che vincolata alle caratteristiche esterne dell'edificio, deve prevedere che l'elio disperso in atmosfera non rientri in altri ambienti e/o paventare ulteriori situazioni di pericolo nell'ambiente circostante.

6. In prossimità della postazione di lavoro o, se esterna, dell'accesso al Laboratorio devono essere installati i display di visualizzazione e monitoraggio in continuo del tenore di ossigeno nel Laboratorio NMR, identificati mediante etichetta inamovibile.

7. In prossimità della postazione di lavoro o, se esterna, dell'accesso al Laboratorio devono essere installati dei **sistemi di monitoraggio della temperatura e dell'umidità relativa** caratterizzanti il Laboratorio NMR, che, a meno di specifiche prescrizioni alternative motivate e consentite dal libretto di istruzioni dello spettrometro, dovranno attestarsi a circa $22^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ di temperatura, e a valori inferiori al 60% di umidità.
8. In prossimità degli stessi display di visualizzazione e controllo del tenore di ossigeno nel Laboratorio NMR, dovranno essere installati i **pulsanti di sicurezza** per
 - a. l'attivazione manuale delle ventilazioni di emergenza;
 - b. lo spegnimento dell'elettronica associata al magnete;
 - c. il distacco della corrente elettrica generale del Laboratorio;Ciascun display e ciascun pulsante di sicurezza dovrà essere chiaramente identificato con etichettatura inamovibile.

Tutti i dispositivi di sicurezza citati dovranno essere installati e tarati rigorosamente alla regola d'arte, e verificati nel loro corretto funzionamento nel tempo.

Allo stesso modo, gli spettrometri dovranno essere controllati periodicamente per garantire la qualità dell'utilizzo ma anche la sicurezza dell'installazione: l'indicazione è di effettuare controlli di mantenimento della corretta funzionalità dei dispositivi di sicurezza almeno ogni 6 mesi, prevedendo quindi due procedure l'anno di taratura dei sensori ossigeno e di verifica degli impianti di ventilazione. Per la periodicità dei controlli sullo spettrometro, si rimanda alle specifiche indicate dai costruttori. Nel laboratorio NMR dovranno essere inoltre previsti degli estintori amagnetici, da apporre con sostegni idonei ed identificazione come per legge; essi possono essere tenuti sia all'interno (se l'ambiente è sufficientemente grande da consentirlo), che all'esterno del laboratorio, purché nelle immediate vicinanze. Se nelle vicinanze del laboratorio NMR sono presenti anche estintori non amagnetici, opportuna etichetta dovrà indicare che non potrà essere utilizzato all'interno delle zone controllate.

La specificità dei rischi presenti all'interno di un laboratorio NMR dovrà essere comunicata prima dell'inizio delle attività alla stazione dei vigili del fuoco competente per territorio, al fine di garantire un corretto svolgimento delle operazioni di messa in sicurezza degli ambienti a seguito di un incidente che dovesse richiederne l'intervento.

8 - CONCLUSIONI

Le applicazioni del fenomeno fisico della Risonanza Magnetica in settori diversi da quello medico stanno sempre più affermandosi.

Tipico esempio è quello della spettroscopia NMR effettuata per motivi di ricerca, tipicamente in laboratori universitari e nei più importanti Istituti di Ricerca Nazionali, dove la frenesia della ricerca tende a volte a far sottovalutare gli aspetti della sicurezza in questo settore.

L'analisi di tipo chimico-fisico, che ha in realtà rappresentato storicamente la prima applicazione del fenomeno caratterizzante la Risonanza Magnetica, è un'esigenza

operativa che negli ultimi anni ha abbracciato, oltre alla chimica organica, anche la biochimica, la biologia molecolare, la chimica farmaceutica e tutti gli studi ad esse correlati. Il minimo comune denominatore fra questi processi di sviluppo è la necessità di utilizzare campi statici di induzione magnetica sempre maggiori, ovvero radiofrequenze di lavoro sempre più alte, comportano un aumento significativo del livello di rischio per gli addetti ai lavori. Livelli più alti di campo magnetico statico si traducono inevitabilmente in un utilizzo sempre più diffuso di magneti superconduttori, nei quali, oltre al fattore di rischio primario si aggiunge quello legato alla presenza di un fluido criogenico.

La valutazione e la gestione del livello di rischio complessivo caratterizzante uno spettrometro NMR, risente purtroppo di un vuoto normativo specifico che non può essere colmato dalla semplice osservanza dei disposti contenuti nel D.Lgs.81/2008.

Con le indicazioni operative contenute nel presente lavoro, si è tentato di operare una sintesi delle conoscenze in materia ad oggi consolidate, esportando ove possibile i modelli di riferimento emanati negli anni '90 per le macchine a risonanza magnetica impiegate a scopo medico, integrandole con una prima proposta di strategia operativa in attesa di un'auspicabile normativa specifica, della quale l'INAIL -area ex ISPESL si sta facendo già promotore nelle sedi governative competenti.

La Sezione Tecnico Scientifica di Supporto Tecnico al SSN in materia di Radiazioni del Dipartimento di Medicina Epidemiologia Igiene ed Ambientale dell'INAIL, auspicando un favorevole accoglimento di questo lavoro nella comunità scientifica di settore, vuole cercare di contribuire, sin dalle presenti "prime indicazioni operative", ad una standardizzazione dei metodi gestionali della sicurezza in ambito NMR. Questo lavoro costituisce ad oggi solo una prima proposta operativa che potrà e dovrà essere certamente implementata e ottimizzata con la maggiore esperienza che ne seguirà nel futuro, nell'obiettivo primario di garantire la salute dei lavoratori e di tutti i soggetti coinvolti nell'utilizzo di queste apparecchiature. In tal senso, è auspicio degli autori l'apertura di una fattiva collaborazione con tutti quegli interlocutori scientifici di settore che mostreranno interesse ad elevare la "cultura della sicurezza" in questo particolare ambito di studio e di lavoro.

BIBLIOGRAFIA

Francesco Campanella, Massimo Mattozzi, Nicola Culeddu, Roberta Curini, *Monografico INAIL Le applicazioni scientifiche della Risonanza Magnetica Nucleare (NMR): criticità, indicazioni e proposte operative per la gestione della sicurezza*, edizione INAIL 2012. ISBN 978-88-7484-265-0-



Radiazioni ionizzanti



I CONTROLLI NON DISTRUTTIVI CON L'IMPIEGO DELLE RADIAZIONI IONIZZANTI. LA PROTEZIONE DEI LAVORATORI E DELLA POPOLAZIONE

Emma Anna Rita Ciconte⁽¹⁾, Rosario Pirrone⁽¹⁾, Paola Barbuto⁽²⁾, Salvatore Procopio⁽²⁾

¹: ASP SPISAL – Servizio di Prevenzione, Igiene e Sicurezza negli Ambienti di Lavoro - Azienda Sanitaria Provinciale di Catanzaro

²: ARPA-Cal – Laboratorio Fisico *Ettore Majorana* - Catanzaro

RIASSUNTO

Lo studio proposto è il risultato di un'attività di monitoraggio su alcune aziende che operano nel territorio calabrese ed effettuano controlli non distruttivi mediante radiografia o gammagrafia industriali su saldature di condotte, metanodotti o tubature presso centrali per la produzione di energia elettrica. L'attività è stata strutturata attraverso una procedura operativa che gli enti preposti al controllo attuano sul territorio al fine dell'applicazione di un mero principio di prevenzione, contenendo le criticità, a partire dalla verifica dei piani di attuazione che precedono l'attività del cantiere: dal trasporto delle sorgenti radioattive necessarie all'esame diagnostico al deposito temporaneo, dalla classificazione delle aree e del personale impiegato, al livello di dose stimato e soprattutto alla verifica dei livelli di radioprotezione durante le fasi di esecuzione delle radiografie o gammagrafie. Nello studio si dà evidenza di alcuni casi analizzati testando la procedura di verifica e il livello di qualità della sicurezza messa in atto. Come è noto, la normativa vigente sulle radiazioni ionizzanti - D.lgs. n.230/95 s.m. e i. - impone al datore di lavoro specifici adempimenti e l'osservanza di indicazioni finalizzate all'applicazione di basilari principi di radioprotezione: giustificazione, ottimizzazione oltre che di limitazione delle dosi individuali dei lavoratori e della popolazione. Lo SPISAL dell'ASP di Catanzaro e l'ArpaCal hanno attivato un programma di attività specifico per la riduzione del rischio connesso all'esposizione da radiazioni ionizzanti, classificati come cancerogeni certi, soprattutto in ambito lavorativo.

1 - INTRODUZIONE

L'articolo 7 dell'allegato IX del decreto legislativo n. 230/95 s.m. e i., impone al datore di lavoro, che deve effettuare delle prove di controllo non distruttive con l'uso di radiazioni ionizzanti, di effettuare una comunicazione di detenzione ed inizio lavori agli enti preposti al controllo e alla prevenzione: Azienda Sanitaria Provinciale, Ispettorato del Lavoro, Vigili del Fuoco e Agenzia Regionale per la

Protezione dell'Ambiente.

L'impiego delle radiazioni ionizzanti, necessariamente mobili, comporta il trasporto di sorgenti radioattive in luoghi di lavoro complessi, variabili e non ben definiti, tali da rendere l'attività particolarmente rischiosa almeno dal punto di vista radioprotezionistico. In genere vengono indicati nella comunicazione trasmessa agli enti: la tipologia e il numero di apparecchi gamma o macchine radiogene impiegati con le relative specifiche, il tipo di radioisotopo e l'attività massima per i primi, il voltaggio e la corrente se trattasi di macchine a raggi X. Viene indicata la durata dell'attività, l'orario massimo di lavoro, il tipo di intervento e la tipologia di lavoratori presenti durante le operazioni di controllo. Il sito di intervento, i soggetti responsabili delle varie fasi, della sorveglianza fisica e medica sono le altre informazioni che di base vengono trasmesse per descrivere questa pratica, intesa come un'attività umana che è suscettibile di aumentare l'esposizione degli individui alle radiazioni, generate da una sorgente artificiale.

Un documento di particolare efficacia informativa è rappresentato dalla relazione dell'Esperto Qualificato che, in ottemperanza alla norma^[1] effettua la classificazione dei lavoratori e delle aree, le valutazioni di dose per i lavoratori e per gruppi di riferimento della popolazione e impartisce le norme di radioprotezione. Inoltre, ottempera di fatto anche agli adempimenti connessi alla protezione dei lavoratori da esposizione ad agenti fisici, previsti dal Titolo VIII del D.Lgs.81/2008 e s.m.i. con riferimento agli obblighi del Datore di lavoro (art. 181)^[2]. Nello stesso documento, infatti, vengono in genere riportate le indicazioni operative da porre in essere per l'effettuazione di un'adeguata valutazione di tutti i rischi connessi all'impiego di sostanze radioattive e l'identificazione delle opportune misure di prevenzione e protezione da adottare.

Come si può considerare dalla lettura degli indicatori descrittivi^[3] (Figura 1) del trasporto di materiale radioattivo sul territorio della Provincia di Catanzaro (2012-13), vi è una movimentazione di materiale per l'impiego ospedaliero e per la gammagrafia industriale. I grafici ricavati dalle comunicazioni ufficiali previste dal decreto legislativo n. 230/95 s.m. e i., sono stati organizzati per anno e tipologia di impiego oltre che per radioisotopi utilizzati per le gammagrafie e per l'attività massima per ogni radionuclide.

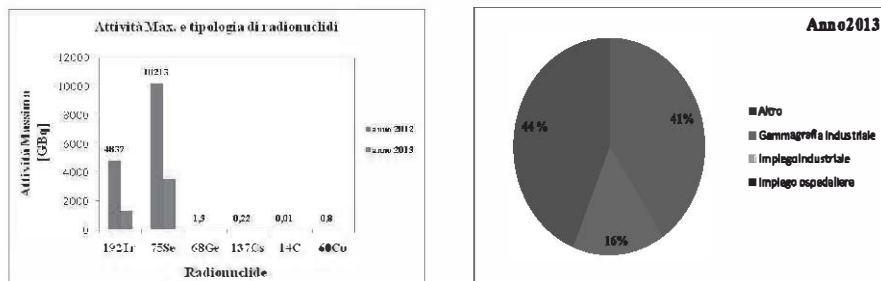


Figura 1: 1a) radionuclidi impiegati in Provincia di Catanzaro; 1b) tipologie di impiego

Come è noto, l'effetto delle radiazioni sugli organi bersaglio dipende dalla radiosensibilità dell'organo ma anche e soprattutto dalla natura del radionuclide e

dalla sua specificità di emettitore se di tipo alfa, beta o gamma e quindi dalla energia lineare di trasferimento della radiazione. È del tutto evidente che conoscere il tipo di radionuclide più frequente permette, in fase di pianificazione, di istruire un'organizzazione medica più adeguata soprattutto in caso di emergenza derivante da incidenti durante il trasporto o la gestione di sostanze radioattive. Per ciascun radionuclide è stata ricavata l'attività massima totale [10^9Bq] considerando le diverse tipologie d'impiego annuo, ben consapevoli che ad esempio i 10.213 GBq di ^{75}Se che, ha un tempo di dimezzamento di 120,4 giorni rappresentano l'attività cumulata in un anno a prescindere dal decadimento tipico del radionuclide esaminato. Il dato, pertanto, rappresenta una situazione annua dinamica e non una sorgente localizzata in un punto o in percorso con un'attività di pari entità.

Considerato che i numeri fanno riferimento al solo territorio provinciale, il risultato è tutt'altro che trascurabile dal punto di vista protezionistico, del controllo, della vigilanza e della prevenzione. Da qui la necessità di strutturare una procedura compatibile con le esigenze e le funzioni istituzionali reciproche tra lo Spisal e l'Arpacal. Auspicabile risulta essere anche un confronto diretto con gli operatori del settore, consapevoli di alcune criticità organizzative degli enti preposti alla verifica che non vantano un patrimonio di risorse umane e tecnologiche adeguato alle specificità del territorio.

2 - MATERIALI E METODI

Le radiazioni elettromagnetiche indirettamente ionizzanti, impiegate per scopi di diagnostica industriale hanno generalmente un'altissima frequenza [v], compresa tra $10^{12} \div 10^{14}$ MHz per i raggi X e 10^{14} MHz per i raggi γ . I raggi X vengono prodotti abitualmente con macchine radiogene che accelerano particelle elementari cariche, che, interagendo su opportuni bersagli, producono i fasci di radiazione da utilizzare. Un tubo a raggi X è costituito da un'ampolla di vetro sotto vuoto ($10^{-5} \div 10^{-6}$ Pa) in cui sono inserite due piastre metalliche, dette elettrodi. Le particelle che vengono accelerate sono elettroni rilasciati dal metallo riscaldato di una delle piastre, detta catodo. Questi elettroni, sfuggiti alla massa metallica riscaldata (effetto termoionico), si muovono liberamente nel vuoto. Tra le due piastre si applica una differenza di potenziale connettendo il catodo al polo negativo del generatore di alta tensione, e l'altra piastra metallica, detta anodo al polo positivo. In tal modo gli elettroni, che hanno carica negativa, vengono accelerati in direzione dell'anodo con una velocità direttamente proporzionale alla tensione fornita dalla sorgente. La velocità acquisita dagli elettroni è proporzionale alla tensione applicata agli elettrodi. Gli elettroni accelerati arrivano sul bersaglio (l'anodo) danno origine a *raggi X di frenamento*, caratterizzati da uno spettro continuo di energie, comprese tra zero e l'energia massima degli elettroni incidenti. Ai raggi X di frenamento si aggiungono i raggi X emessi dall'anodo, tipici del metallo di cui questo è costituito: *raggi X caratteristici*. In radiodiagnostica industriale far funzionare un normale apparecchio radiografico si può impiegare una tensione di alimentazione del tubo fino a 360 kV. Tensioni più elevate permettono di indagare spessori di materiali con dimensioni importanti. I tubi a raggi X emettono radiazioni solo se vengono alimentati dal generatore ad alta tensione. In generale un

controllo radiografico con raggi X permette un'esplorazione bidimensionale e quindi necessita di ulteriori esami per completare una panoramica di tipo spaziale.

I raggi γ , anche essi impiegati per diagnostica industriale, sono radiazioni elettromagnetiche della stessa natura dei raggi X e della luce visibile e hanno una lunghezza d'onda minore di quella dei raggi X e quindi sono più penetranti. Possono essere prodotti da sostanze naturali o artificiali. In gammagrafia industriale generalmente vengono impiegati radionuclidi artificiali quali, l'Iridio (^{192}Ir), il (^{137}Cs) cesio, il (^{60}Co) cobalto, e il (^{75}Se) selenio.

In genere un apparecchio per gammagrafia è formato da una scatola di protezione in piombo, un contenitore porta sorgente radioattiva, un telecomando meccanico uno o più tubi rigidi o flessibili. Spesso la tecnica di gammagrafia è alternativa alla radiografia a raggi X, perché non ha bisogno di energia elettrica, ha un'elevata penetrazione, facilità di trasporto e costi più contenuti. A differenza dei raggi X non può essere spenta e presenta notevoli problemi di sicurezza.

Entrambe le radiazioni indicate vengono usate in ambito industriale poiché possono penetrare la materia e sono assorbite in maniera differenziale a seconda della caratteristica del materiale. Quando una radiazione attraversa un materiale viene assorbita; se il materiale presenta dei difetti l'assorbimento è minore e su una lastra fotografica viene registrata la differenza di assorbimento (Figura 2).

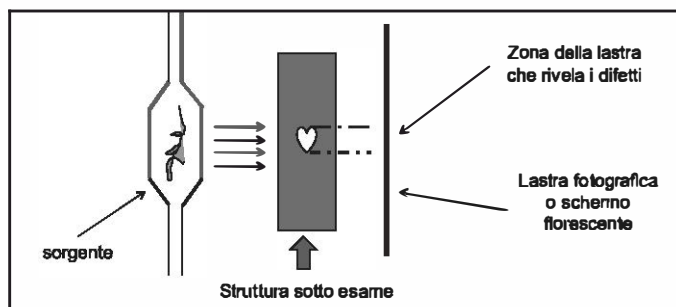


Figura 2: l'assorbimento della radiazione permette di individuare il difetto

L'equazione [1] nota come legge dell'attenuazione lineare o dell'assorbimento^[4] spiega il fenomeno dell'attenuazione della radiazione nei diversi materiali:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad [1]$$

dove I è l'intensità della radiazione; I_0 è l'intensità iniziale e μ è il coefficiente di assorbimento lineare (in cm^{-1}) che è funzione del materiale.

L'applicazione della legge, i dati riferiti alla tipologia di sorgenti e alla sua attività consentono in genere di definire i carichi di lavoro relativi alle ore di esposizione a settimana sia per le gammagrafie che per le radiografie usate con tecnica in panoramica o in doppia parete. Per le valutazioni di dose, generalmente, visto che trattasi di cantieri mobili di tipo temporaneo, viene applicato il concetto di raggio di sicurezza avente centro nel fuoco della sorgente e considerati i parametri di set up più conservativi come il fattore occupazionale (1) e il fattore d'uso per le radiografie: 1 in tecnica panoramica e 1/4 in doppia parete. Vengono classificate le

zone in controllata e sorvegliata e il personale riconosciuto in *Categoria A e persone del pubblico*. La procedura messa a punto per il controllo e la verifica dei piani di sicurezza previsti è caratterizzata da due componenti principali:

- a) validazione dei documenti prodotti dal datore di lavoro prima e dopo l'esecuzione delle prove;
- b) sopralluoghi effettuati in cieco durante l'esecuzione delle radiografie o gammagrafie per la verifica dei livelli dei ratei equivalenti di dose prodotti, delle distanze di sicurezza e della cartellonistica presente durante le fasi di attività.

Dagli esami della documentazione di archivio, elaborati su quasi un quinquennio, e dalle informazioni prodotte dal datore di lavoro, emerge una buona presentazione della problematica in esame ed un'accurata stima teorica dei rischi derivanti dall'impiego di sorgenti ionizzanti. Ovviamente, poiché non espressamente richiesto dalla norma, non vi è alcuna traccia sull'attività post prove; non esistono infatti documenti a disposizione degli enti che possano validare gli esami eseguiti dal punto di vista radioprotezionistico o che la diagnostica industriale sia stata eseguita in sicurezza, oppure che la classificazione delle zone sia stata in qualche misura violata. E anche sulla base delle informazioni fornite, con l'applicazione di questa procedura di controllo sono emerse delle criticità anche dal punto di vista formale. Una procedura di controllo semplice e praticabile può produrre in termini di confronto e risultato, rivelazioni utili anche sul piano dell'informazione oltre che incontrare un giusto apprezzamento da parte degli operatori e anche del committente. Lo schema base della procedura è rappresentato in **Figura 3**.

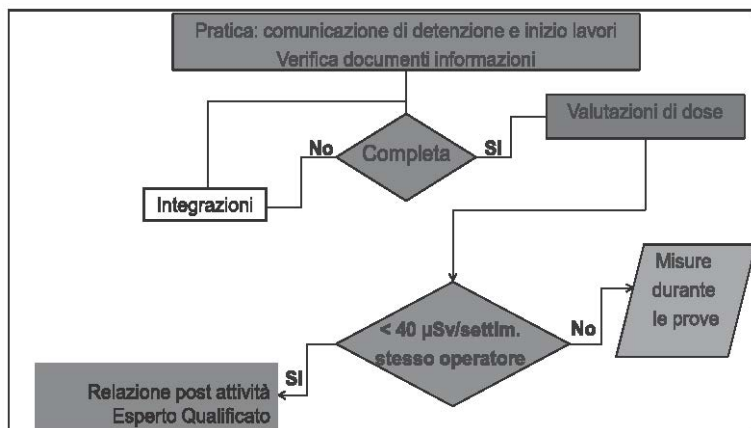


Figura 3: schema base di procedura di verifica per la diagnostica industriale

La prima fase riguarda l'esame della documentazione e delle informazioni proposte sull'attività da realizzare da parte del datore di lavoro. In genere vengono allegati:

- relazione tecnica di sorveglianza fisica con affidamento di mansioni, direttive dell'Esperto Qualificato (EQ) per il suo delegato, procedure di intervento in caso di incidente con sorgenti radioattive;
- nulla osta prefettizio;
- decreto di autorizzazione al trasporto di materiale radioattivo;
- planimetria.

Quasi sempre emerge la mancanza di una comunicazione chiara e puntuale sull'inizio reale dell'attività. Nella maggior parte dei casi, anche in modo elettronico si chiede di integrare la documentazione precisando la data effettiva dell'inizio della pratica senza la quale, tra l'altro, organizzare un intervento di verifica può risultare persino problematico. La seconda fase è legata alla valutazione della dose settimanale di cui uno stesso operatore è suscettibile.

Si tratta, ovviamente, di una ipotesi conservativa visto che nella realtà può verificarsi una turnazione della forza lavoro impiegata. A partire dalla valutazione di dose presunta suscettibile, stabilita sulla base di alcune considerazioni storiche e sulla tipologia di intervento, si è stabilita una dose di riferimento pari $40 \mu\text{Sv/settimana}$. In particolare la procedura prevede di attuare delle verifiche dirette con sopralluoghi e misure in cieco da parte degli organi di controllo se la dose presunta stimata è maggiore di $40 \mu\text{Sv/settimana}$.

Se invece la dose individuale stimata risultasse inferiore a quella stabilita come riferimento ci si affida alla relazione post attività dell'Esperto Qualificato (EQ), che attualmente non è obbligato a fornire alcuna indicazione sull'andamento dell'attività, se non in caso di incidente o di superamento delle valutazioni da lui stesso effettuate. Si rammenta che, pur se legato da un rapporto di tipo economico che intercorre tra l'Esperto Qualificato e il datore di lavoro, egli è un professionista inserito nell'elenco del Ministero del Lavoro e garante della sorveglianza fisica dei lavoratori e della popolazione, in quanto esperto di radioprotezione. In genere, a parità di condizioni di superamento della dose prevista nella procedura si considerano altri criteri per effettuare le misure durante la diagnostica industriale: l'attività del radionuclide e la durata della pratica.

3 - RISULTATI

La procedura proposta, di recente applicazione ha già determinato dei vantaggi consentendo agli operatori della vigilanza e della prevenzione di esercitare le funzioni istituzionali, pur operando in situazioni di palese carenza di risorse e mezzi disponibili. I risultati acquisiti descrivono delle attività che presentano comunque delle criticità: in prima considerazione l'indicazione sull'inizio della pratica. Tutte quelle esaminate sono in genere non coerenti con le date dichiarate nella relazione dell'EQ e che normalmente indicano che nell'anno solare verranno effettuati dei controlli non distruttivi.

Questa situazione di imprecisione è quasi certamente autorizzata dall'allegato IX cap. 7, par. 7.2, lettera b) punto 1 del decreto n. 230/95 che prevede l'obbligo di inserire nel nulla osta la specifica prescrizione di *informare, almeno quindici giorni prima dell'inizio dell'impiego in un determinato ambito, gli organismi di vigilanza territorialmente competenti*, ma non viene specificato^[5] di indicare che l'evento deve essere esattamente definito nel tempo e che la comunicazione stessa ha valenza per il singolo evento lavorativo. Dal punto di vista documentale le relazioni degli EQ e le informazioni, oltre che le valutazioni di loro competenza, risultano complete e puntuali, anche quando vi è la presenza di più macchine e viene specificatamente indicato di non impiegare dispositivi per raggi X o γ simultaneamente.

Le attività direttamente controllate, dimostrano che le valutazioni di dose previste dagli EQ sono verificate, così come la classificazione delle aree: soprattutto quella controllata (lavoratori di cat. A con dose equivalente pari a 6 mSv/a). Nei cantieri, durante le operazioni di controllo, è carente la segnaletica relativa ai rischi derivanti dall'impiego di sorgenti ionizzanti, così come per i vettori autorizzati al trasporto delle sostanze radioattive. Non vi è certezza che il trasporto delle sorgenti impiegate per la diagnostica industriale avvenga su percorsi esterni ai centri abitati, e in qualche occasione non è adeguata la segnaletica esposta sugli automezzi. In alcuni casi verificati direttamente, i lavoratori non indossavano i dosimetri personali e quello ambientale non sempre era disponibile.

La relazione di post attività prodotta dagli esperti qualificati, a cui è richiesta e non dovuta, contiene in genere le seguenti informazioni: dati misurati durante le fasi di controllo non distruttivo, le condizioni di misura, il fondo ambientale, la taratura degli strumenti e lo stato di formazione del personale che opera, il quale a volte sembra non consapevole completamente dei rischi derivanti. Viene richiesta anche una documentazione fotografica. In **Tabella 1** si riportano a titolo di esempio due attività vagliate nell'anno 2014 con la procedura descritta.

Tabella 1:alcuni esempi di attività per l'anno 2014

Tipologia di intervento	Equivalente di dose stimate (zona controllata) [μ Sv/settimana]	Verifiche Strumentali da parte degli Enti
Gammagrafia su giunti - ^{75}Se	3	No
Radiografia su tubi Raggi X	48	Si
Per il gruppo di Riferimento	Fondo ambientale	

4 - CONCLUSIONI

Vista la quantità e qualità di attività presenti sul territorio che impiegano sostanze radioattive si ritiene di dover intensificare le azioni di verifica, compatibilmente con le criticità organizzative degli enti. La procedura pertanto consente di rispondere a tale esigenza nel breve periodo, evitando che le attività presenti sul territorio e che possono rappresentare un rischio in caso di incidenti o di applicazioni non corrette, vengano svolte senza il dovuto controllo.

Si precisa che, in ogni caso, la procedura, che è complementare alla verifica con sopralluogo, indipendentemente da ogni specifica, si applica nei periodi in cui il personale degli enti interessati non è in grado, per carichi di lavoro eccessivi, di poter soddisfare le richieste derivanti dalle comunicazioni di detenzione delle sorgenti e di inizio lavori. Inoltre, l'esercizio del controllo indiretto attraverso la

valutazione della relazione post attività dell'EQ, si rende indispensabile in quanto, trattandosi di attività svolte spesso in orari notturni o in giorni festivi, il personale di alcuni Enti preposti al controllo, a causa di iter amministrativi e autorizzativi interni assai complicati, potrebbe non essere disponibile.

5 – BIGLIOGRAFIA

- [1] Decreto Legislativo n. 230 del 17 marzo 1995. *Attuazione delle direttive 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 92/3/Euratom e 96/29/Euratom in Materia di Radiazioni Ionizzanti*. Gazzetta Ufficiale del 13 giugno 1995 - Suppl. Ordinario n. 136.
- [2] Decreto Legislativo n. 81 del 9 aprile 2008. *Attuazione dell'Articolo 1 della Legge 3 Agosto 2007, n. 123 in Materia di Tutela della Salute e della Sicurezza nei Luoghi di Lavoro*. Gazzetta Ufficiale n. 101 del 30 aprile 2008 - Suppl. Ordinario n.108.
- [3] *Atti Arpacal per la Prefettura Territoriale di riferimento: piano per l'emergenza sul trasporto di materiale radioattivo*, anno 2014
- [4] *Fondamenti fisici della radioprotezione*, Maurizio Pelliccioni 1989, Ed. Pitagora
- [5] *Aspetti di radioprotezione nell'ambito delle gammagrafie industriali*.
C. Giovani C., M. Garavaglia, P. Di Marco, L. Piccini; Bollettino Airp anno XXXIX Volume 171 n. 3,4 Agosto 2012 ISSN 1591-3481 | e ISSN 2281-180X

ANALISI DEI RISCHI DA RADIAZIONI IONIZZANTI DERIVANTI DALLE ATTIVITÀ SPERIMENTALI CON GENERATORE DI NEUTRONI DELTPO D-T

Nadia Cherubini¹, Gian Marco Contessa¹, Alessandro Dodaro¹, Giada Gandolfo², Luigi Lepore², Giuseppe A. Marzo¹, Francesco Raona², Sandro Sandri¹

- ¹: ENEA – Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile, C.R. Casaccia, Santa Maria di Galeria (Roma)
²: Università di Roma “Sapienza” – Dipartimento Scienze di Base e Applicate per l’Ingegneria, Roma

ABSTRACT

Ai fini della radioprotezione delle attività sperimentali svolte utilizzando fasci pulsati di neutroni a 14 MeV prodotti da un generatore commerciale del tipo D-T si è condotta l'analisi dei rischi derivanti dalle radiazioni ionizzanti: una prima valutazione teorica della dose del fascio emesso per stimare l'esposizione degli operatori è stata effettuata utilizzando il coefficiente di dose efficace per fluenza neutronica a 14 MeV dell'ICRP 2010 e i dati forniti dal costruttore del generatore. La valutazione ha consentito di definire, seppure in via approssimata, l'entità delle schermature necessarie in considerazione dei carichi di lavoro e dell'occupazione delle aree limitrofe.

Per effettuare una puntuale valutazione del rischio ed ottimizzare la radioprotezione è stata inoltre eseguita una *determinazione* della distribuzione spaziale dei neutroni emessi dal generatore mediante il codice MCNP, Monte Carlo N-Particle code, sviluppato presso il Laboratorio Nazionale di Los Alamos, codice di trasporto per neutroni, fotoni ed elettroni che utilizza il metodo Monte Carlo.

Le analisi effettuate hanno consentito di validare la sicurezza dell'installazione e sono alla base della definizione delle procedure di esercizio e intervento che fanno parte del sistema di sorveglianza fisica.

1 - INTRODUZIONE

La presente relazione illustra gli studi effettuati per valutare i livelli di esposizione del personale nell'ambito delle attività sperimentali svolte utilizzando un generatore commerciale di neutroni del tipo D-T.

Le valutazioni riportate, preventive all'impiego del generatore, sono finalizzate ad ottemperare al principio di ottimizzazione della radioprotezione in funzione del carico di lavoro, e quindi alla stesura di adeguate procedure di utilizzo dell'apparecchiatura e alla progettazione di eventuali schermature.

Lo studio è strutturato in due fasi distinte: una prima fase di valutazione teorica della dose del fascio emesso utilizzando tra l'altro il coefficiente di dose efficace per

fluenza neutronica [2] e una seconda fase di simulazione della distribuzione spaziale dei neutroni emessi dal generatore mediante il codice di trasporto di radiazione MCNP, Monte Carlo N-Particle [1].

2 - IL GENERATORE DI NEUTRONI THERMO SCIENTIFIC MP320 [4]

L'attività lavorativa prevista comporta il rischio di esposizione esterna a radiazioni ionizzanti derivanti dall'impiego di un generatore di neutroni commerciale trasportabile (**Figura 1**), dedicato ad applicazioni in situ o in laboratorio. Il generatore utilizzato emette impulsi di neutroni caratterizzati da un'energia media nominale di 14 MeV attraverso la reazione di fusione deuterio-trizio (D-T): $D+T \rightarrow n + {}^4\text{He} + 17.6 \text{ MeV}$.

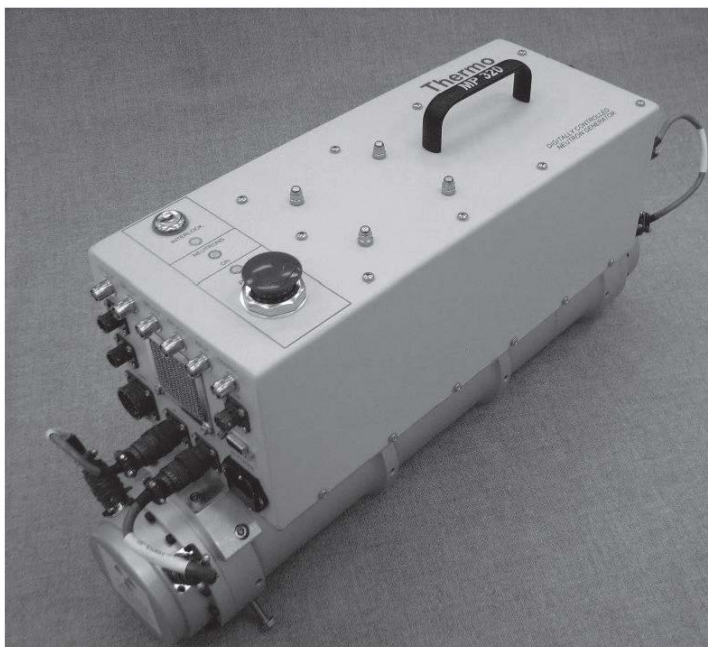


Figura 1: Generatore di neutroni Thermo Scientific MP320.

Il sistema è configurato per ottenere lo stesso numero medio di neutroni per secondo qualunque siano la durata e la frequenza dell'impulso. Ne deriva che il numero di neutroni per singolo impulso è stabilito dal software di controllo dello strumento in relazione alla frequenza e al duty factor impostati dall'utente.

Per mantenere adeguate condizioni di sicurezza per gli operatori durante le attività di lavoro si è scelto di utilizzare un'intensità di emissione neutronica di $\sim 1 \cdot 10^6$ n/s, (frequenza dell'impulso: 1 kHz; tensione di accelerazione: 40 kV; corrente del fascio: 20 μA), sebbene l'apparecchiatura sia capace di produrre rese fino a $\sim 1 \cdot 10^8$ n/s.

3 - VALUTAZIONE TEORICA DELL'ESPOSIZIONE DEGLI OPERATORI IN CONDIZIONI NORMALI DI OPERAZIONE E IN CASO DI INCIDENTE

Sulla base dei dati riportati, forniti dal costruttore del generatore, è stata fatta una valutazione del rateo di dose a un metro di distanza dal generatore nelle condizioni sperimentali di impiego suddette per stimare l'esposizione degli operatori.

Supponendo una resa $\sim 1 \cdot 10^6$ n/s si può valutare che durante un'ora di funzionamento siano emessi $\sim 1 \cdot 10^6 \cdot 3600 = 3.6 \cdot 10^9$ n/h, con un rateo di fluenza medio a 1 m pari a $3.6 \cdot 10^9 / (4\pi \cdot 100^2) = 2.9 \cdot 10^4$ n/(cm² h).

Durante il funzionamento, il rateo di dose in un punto è dato da:

- una componente diretta (neutroni di energia nominale) dal generatore al punto in esame;
- un componente diffusa (neutroni di più bassa energia) dovuta allo scattering dei neutroni emessi dal generatore con l'ambiente in cui esso opera.

In relazione a queste considerazioni si sceglie conservativamente il coefficiente di dose efficace per fluenza neutronica in configurazione AP (Antero-Posteriore), pari a 500 pSv·cm² (Figura 2), che corrisponde al massimo coefficiente indicato nella pubblicazione di riferimento intorno all'energia media [ICRP 2010], valutando quindi che in direzione del fascio nel punto di massima emissione il rateo di dose efficace a 1 m è pari circa a $2.9 \cdot 10^4 \cdot 500 \cdot 10^{-6} \approx 14 \mu\text{Sv/h}$.

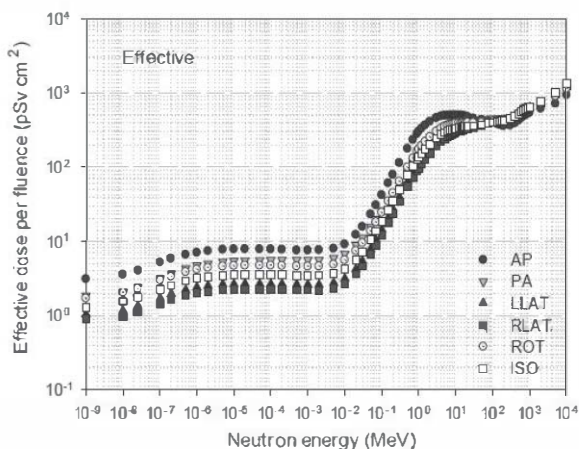


Figura 2: Dose efficace per fluenza neutronica (ICRP 2010).

In considerazione del fatto che durante le attività sperimentali si prevede che il generatore rimanga acceso per un tempo massimo di 10 minuti all'ora e che gli operatori possano permanere ad una distanza non inferiore a 5 m in aria libera dal generatore durante l'utilizzo, la dose ricevuta da ogni operatore in seguito all'impiego giornaliero del generatore per otto ore lavorative non supera 500 μSv annui.

Eventi anomali che determinano esposizioni superiori a quelle dovute al normale

utilizzo possono riguardare l'esposizione durante l'emissione del fascio a distanze dell'ordine di 1 m, dove il rateo di dose efficace è appunto 14 $\mu\text{Sv/h}$. È poco probabile che qualcuno si possa avvicinare a meno di 1 m dal fascio emesso durante il funzionamento in virtù della presenza di apposita cartellonistica e segnaletica luminosa. In ogni caso a 50 cm il rateo di dose è 56 $\mu\text{Sv/h}$ e a 10 cm si arriva a 1,4 mSv/h, per cui anche permanendo nelle immediate vicinanze del generatore per la durata di un intero ciclo di funzionamento (10 minuti all'ora) si raggiungono dosi dell'ordine di 200 μSv . Ne segue che anche nel caso di eventi anomali e incidentali non vi è il rischio di esposizioni rilevanti per le persone presenti.

La produzione neutronica determina anche l'attivazione dei materiali investiti dal fascio, ma l'intensità di emissione e la durata del funzionamento sono tali da rendere completamente trascurabile la formazione di radionuclidi persistenti in quantità rilevanti dal punto di vista radioprotezionistico dopo lo spegnimento del generatore. Gli operatori o altre persone possono quindi avvicinarsi all'apparecchiatura senza subire esposizioni superiori al fondo ambientale anche dopo l'utilizzo del generatore. Ciò premesso, la valutazione dello stato radiologico in caso di emergenza riguarda solo la potenziale rottura del generatore con conseguente fuoriuscita del ^3H in esso contenuto, per un totale di massimo 80 GBq di ^3H disperso nell'ambiente.

In queste condizioni incidentali la dose ricevuta da un operatore coinvolto sarebbe pari a:

$$(\text{dose operatore}) = (\text{Attività } ^3\text{H}) \cdot (\text{tempo permanenza}) \cdot (\text{rateo respirazione}) \cdot (\text{coefficiente dose}) / (\text{volume area}) \cdot (n \text{ ricambi}).$$

Considerando un rateo di respirazione di 1,2 m^3/h , un coefficiente di dose per inalazione di acqua triziata pari a $1,8 \cdot 10^{-11} \text{ Sv/Bq}$, un volume medio dell'area di lavoro di 1000 m^3 con 3 ricambi per ora, e che tutto il contenuto di ^3H , ossia 80 GBq, sia disperso nell'ambiente, si ottiene una dose efficace dell'ordine di 100 μSv per un operatore che permanga nell'area per 10 minuti dopo l'incidente.

4 - VALUTAZIONE DELL'ESPOSIZIONE DEGLI OPERATORI MEDIANTE SIMULAZIONE MONTE CARLO

Ad oggi, la simulazione Monte Carlo si dimostra il metodo più efficace a simulare la produzione neutronica di un generatore di neutroni a fusione, soprattutto per quanto concerne l'interazione dei neutroni prodotti con tutti i materiali circostanti il target in cui avviene la reazione.

Se teoricamente risulta semplice valutare, in un punto, il rateo di dose derivante dalla componente neutronica diretta, lo stesso non può dirsi per il contributo alla dose da componente neutronica diffusa, la cui valutazione analitica è eccessivamente complessa e variabile da caso a caso.

La simulazione Monte Carlo può, in questo senso, essere di enorme ausilio al radioprotezionista, perché, una volta costruita una riproduzione della realtà sufficientemente fedele all'interno del codice di simulazione, il risultato finale si dimostra essere accurato e raggiungibile in tempi brevi, a patto che si disponga di un'adeguata potenza di calcolo.

La forza del codice MCNP, basato sul metodo Monte Carlo, sta nel ripercorrere tutti i possibili cammini della radiazione all'interno della geometria simulata, e la

statistica finale della radiazione pervenuta nel punto di interesse dipende solo dal numero di “storie” che l’utente può simulare con i tempi e le risorse di calcolo che ha a disposizione.

In questo lavoro, il codice stocastico di trasporto di radiazione MCNP (Monte Carlo N-Particle) è utilizzato nella sua versione MCNPX 2.5.0. Di default il codice trasporta gli ioni deuterio e trizio nella materia, ma non è in grado di trattare la reazione di fusione tra essi. Un modello di sorgente neutronica da fusione ‘ad hoc’, sviluppato da Pillon, et al. [3] è stato utilizzato per simulare dentro MCNP l’output neutronico di un generatore D-T: la cinematica della reazione mostra che i neutroni prodotti sono distribuiti energeticamente e angolarmente, in una banda nell’ordine di qualche MeV intorno all’emissione teorica 14.1 MeV e con un’anisotropia angolare di pochi %. Il detto modello è stato testato e validato sperimentalmente attraverso il generatore di neutroni FNG del Centro Ricerche ENEA di Frascati.

La sorgente di neutroni da fusione appena discussa è stata utilizzata, in questo lavoro, per riprodurre un modello MCNPX del generatore di neutroni D-T Thermo Scientific MP-320, capace di riprodurre l’emissione reale del generatore in maniera sufficientemente accurata. La Figura riporta il confronto tra l’emissione neutronica angolare del generatore e la distribuzione calcolata dal modello MCNPX. La sovrapposizione della curva simulata con il dato reale è frutto di un’accurata modellizzazione - all’interno dell’input file - degli “internals” del generatore, la cui presenza causa la forte anisotropia angolare visibile nella Figura . Sebbene i neutroni prodotti abbiano energie nell’ordine della decina di MeV, la loro interazione con i materiali di cui si compone la macchina è tutt’altro che trascurabile.

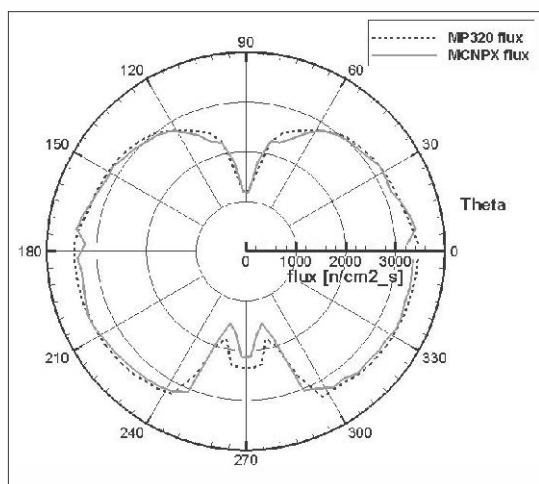


Figura 3: Confronto fra la distribuzione angolare del flusso neutronico (@ 50 cm di distanza dal centro del target) simulata dal modello MCNPX con quella del generatore MP-320.

Il modello MCNPX del generatore può essere, pertanto, utilizzato sia come sorgente di radiazione per simulare analisi con tecniche attive di interrogazione neutronica,

sia per scopi inerenti la radioprotezione, nelle configurazioni sperimentali in cui lo strumento deve essere utilizzato. L'enorme passo avanti di questo approccio consiste nel poter prevedere numericamente la dose all'operatore in qualsiasi scenario ipotizzabile, con ottima accuratezza.

Di seguito si riportano due esempi di calcolo del rateo di dose valutato con MCNPX:

- Caso 1) una condizione ideale di generatore in ambiente infinitamente esteso, ove i neutroni che pervengono al punto d'interesse sono derivanti da sola radiazione diretta, poiché non esiste una componente di radiazione diffusa (Figura 4);
- Caso 2) una condizione reale di generatore operato in un bunker per neutroni, ove nel punto d'interesse alla misura di dose perviene sia una componente di radiazione diretta che una componente di radiazione diffusa, il cui effetto è quello di aumentare la dose nel suddetto punto, rispetto alla situazione precedente (Figura 5).

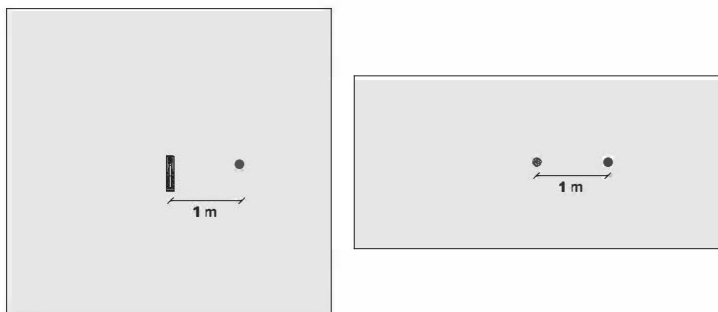


Figura 4: Caso 1: calcolo di dose tramite MCNPX @ 1 m di distanza dal centro del target, in una geometria “aria libera”.

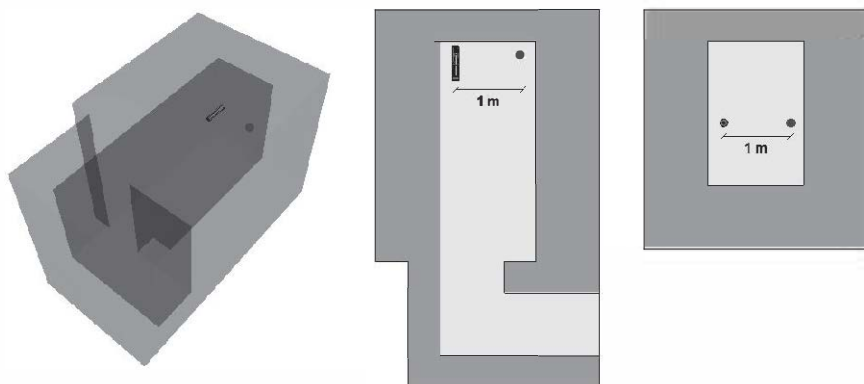


Figura 5: Caso 2: calcolo di dose tramite MCNPX a 1 m di distanza dal centro del target, in una geometria “bunker” per neutroni.

I ratei di dose (nel settore angolare corrispondente alla massima emissione del generatore, a distanza 1 m dal centro del target del generatore) calcolati da MCNPX nelle situazioni descritte, per un'emissione neutronica del generatore di 10^6 n/s, sono stati calcolati pesando lo spettro registrato dal codice per il fattore di conversione in dose efficace (configurazione AP) derivante dalla Pubblicazione ICRP-116, secondo l'equazione $\dot{E} = \phi(\vec{r}, E) \times CC_{AP}(E)$. I ratei di dose calcolati risultano:

$$\dot{E}(\text{Caso 1}) = 12.23 \mu\text{Sv/h} \quad (1.1)$$

$$\dot{E}(\text{Caso 2}) = 23.24 \mu\text{Sv/h} \quad (1.2)$$

Il rateo di dose calcolato da MCNPX nel Caso 1, eq. (1.1), è perfettamente compatibile con il calcolo effettuato 'sulla carta', come al paragrafo precedente.

Il rateo di dose calcolato da MCNPX nel Caso 2, eq. (1.2), tenendo conto della radiazione diffusa della particolare geometria d'irraggiamento, riporta un valore di dose più che raddoppiato, mostrando che il solo calcolo della dose da radiazione diretta è insufficiente ad effettuare una buona radioprotezione dell'operatore, visto che porterebbe ad importanti sottostime.

I tempi di calcolo richiesti dipendono fortemente dal tipo di configurazione processata, e maggiore è il numero delle interazioni possibili della radiazione con i materiali nella geometria descritta, tanto maggiore è il tempo che –mediamente– è richiesto alla simulazione per raggiungere ottime precisioni. Con riferimento ai due casi processati, il più oneroso è il Caso 2, che ha richiesto un tempo di run di circa 1 ore con 400 processori. Le risorse di calcolo utilizzate in questo lavoro sono state fornite dall'infrastruttura CRESCO/ENEAGRID High Performance Computing e dal suo staff; si veda <http://www.cresco.enea.it> per maggiori informazioni. L'infrastruttura CRESCO/ENEAGRID High Performance Computing è finanziata da ENEA, l'Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile e dai programmi di ricerca dell'Unione Europea.

5 - CONCLUSIONI

E' stata effettuata una valutazione della dose del fascio emesso dal generatore di neutroni Thermo Scientific MP320 del tipo D-T, per stimare i livelli di esposizione del personale coinvolto nelle attività sperimentali. Il calcolo teorico e la simulazione in un bunker mediante il codice di trasporto di radiazione MCNP hanno dato risultati coerenti, consentendo di calcolare un rateo di dose a 1 m di distanza nella direzione di massima emissione del generatore pari a $23.24 \mu\text{Sv/h}$, in presenza di radiazione diffusa. Questo studio ha permesso di validare la sicurezza delle attività con il generatore, che, in considerazione dei carichi di lavoro, non richiedono l'utilizzo di schermature per gli operatori ma solo di adeguata cartellonistica e segnaletica luminosa per evitare l'accesso a personale non autorizzato.

Ringraziamenti

Si ringraziano per il prezioso contributo l'Ing. Mario Pillon, il Dott. Stefano Loreti, la Dott.ssa Lina Quintieri e il Dott. E. Borra dell'ENEA e il prof. Romolo Remetti dell'Università di Roma "Sapienza".

6 - BIBLIOGRAFIA

- [1] Briesmeister J. F., Ed, "MCNP – A general purpose Monte Carlo code for neutron and photon transport", Los Alamos National Lab. – Report LA – 13709 – Manual Version 4C (April 2000).
- [2] ICRP, 2010. Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures. ICRP Publication 116, Ann. ICRP 40(2–5).
- [3] Pillon M. [et al.], Characterization of the source neutrons produced by the Frascati Neutron Generator [Rivista] // Fusion Engineering and Design. - 1995. - 28. - p. 683-688.
- [4] Thermo Scientific MP320 Neutron Generator Operation Manual P/N 120004
www.thermo.com/neutrongenerators

DISPOSITIVI DI PROTEZIONE DALLE RADIAZIONI X IN AMBITO SANITARIO: NON SOLO PIOMBO

Domenico Acchiappati⁽¹⁾, Francesco Campanella⁽²⁾, D'Avanzo Maria Antonietta⁽²⁾, Moretti Laura⁽²⁾

¹: Azienda USL di Modena - Struttura Complessa Fisica Medica;

²: INAIL - Dipartimento Medicina, Epidemiologia, Igiene del lavoro ed ambientale
Sezione Tecnico Scientifica di supporto tecnico al SSN in materia di Radiazioni

1 – INTRODUZIONE

L'evoluzione tecnologica ha comportato una sempre minore presenza di piombo nel materiale utilizzato come schermatura per i raggi X, a vantaggio di altri elementi.

Di conseguenza è possibile che il Dispositivo non presenti, per le energie a cui può essere esposto, una curva di assorbimento sovrapponibile a quella caratteristica del piombo e che, quindi, fornisca un grado di protezione differente rispetto al valore assicurato dallo spessore, di quest'ultimo, di cui è dichiarato equivalente.

I materiali che costituiscono la componente schermante di questi DPI sono, altresì, soggetti a deterioramento nel tempo, con conseguente formazione di fori o "crepe" che ne riducono l'efficienza, rendendo necessario il controllo periodico e l'eventuale espulsione dal ciclo produttivo.

E', quindi, essenziale per il Datore di Lavoro gestire la materia per mezzo delle figure professionali individuate dalla norma.

Obiettivo di questo lavoro è quello di procedere all'analisi delle problematiche legate all'adozione ed impiego di questi dispositivi, e condividere i possibili comportamenti da adottare.

2 – LA CERTIFICAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DI ATTENUAZIONE

Storicamente, l'elemento schermante dei Dispositivi di Protezione Individuali per la radiazione X era costituito dal piombo. Di conseguenza il suo "spessore" ne poteva descrivere, in maniera sintetica e puntuale, le caratteristiche radioprotezionistiche.

Le problematiche connesse al peso e alla sostenibilità ambientale di questo elemento hanno, però, favorito la ricerca di soluzioni alternative caratterizzate dalla presenza, nella matrice, di altri metalli al fianco o in alternativa ad esso.

Per questo, oggi, è disponibile un'ampia gamma di prodotti che si differenziano proprio per la composizione del materiale schermante.

Le significative differenze, che caratterizzano il trasferimento di energia e l'assorbimento nei vari possibili attenuatori metallici, rendono difficile individuare tra loro uno che da solo fornisca un'attenuazione efficace sull'intero intervallo di energie di interesse. Per questo vengono proposte all'utente soluzioni diverse, molto spesso non equivalenti tra loro, che possono prevedere anche l'impiego di più elementi attenuatori, sia coesistenti nella stessa miscela sia presenti separatamente in più strati sovrapposti⁽¹⁾⁽²⁾.

In Letteratura vi sono numerosi lavori che dimostrano come la valutazione degli attuali DPI per le radiazioni X, sulla base della sola certificazione delle caratteristiche di attenuazione (esprese in termini di millimetri di piombo equivalenza) per un unico valore di tensione di picco, sia assolutamente inadeguata⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾. Quanto detto conferma la necessità, da tempo stabilita anche dalle norme CEI⁽⁷⁾, di fornire all'utente una ben più ricca quantità di informazioni, che dovrebbero essere sempre riportate all'interno della documentazione di accompagnamento del DPI.

Tra le pubblicazioni, in cui si rappresenta come buona parte dei Dispositivi proposti non soddisfino gli standard fissati dalle norme IEC, citiamo quella di Crocker⁽⁸⁾. In questo caso la survey ha evidenziato che nel 62% dei casi lo spessore piombo equivalente misurato non era corrispondente a quanto dichiarato e che nel 43% risultava insufficiente rispetto a quanto richiesto dal progetto radioprotezionistico.

Sarebbe, quindi, opportuno che l'Esperto Qualificato, in sede di selezione dei prodotti, oltre ad acquisire tutte le certificazioni richieste dalla CEI, proceda anche ad una valutazione sperimentale delle caratteristiche di attenuazione dei diversi Dispositivi offerti.

Obiettivo di questo intervento non è la verifica delle certificazioni di attenuazione, presentate dai singoli potenziali fornitori, ma l'inter-confronto tra i dispositivi selezionabili. Non sarà, quindi, necessario disporre dello stesso set-up sperimentale ed, in particolare, del fascio radiogeno richiesto dalla norma per la certificazione dei materiali schermanti⁽⁹⁾.

3 – ERGONOMICITÀ DEL DPI

Nella scelta del DPI, oltre al grado di attenuazione e, in generale, alla coerenza con le indicazioni di radioprotezione formulate dall'Esperto Qualificato, devono essere valutati altri aspetti quali: il peso complessivo e la sua distribuzione; la vestibilità e il grado di protezione alle altre fonti di rischio presenti.

Infatti, questi Dispositivi, sono efficaci nel ridurre la dose di esposizione alle radiazioni X, ma hanno l'inconveniente di essere comunque pesanti con un possibile effetto negativo sulla salute di chi li indossa.

È quindi opportuno coinvolgere adeguatamente nel processo valutativo, ciascuno per quanto di propria competenza, il Responsabile SPP, il Medico addetto alla sorveglianza medica e i lavoratori.

4 - VERIFICA DELL'EFFICIENZA DEI DPI

Gli Organismi Internazionali, primo fra tutti la IAEA, indicano la necessità di un sistematico controllo periodico dell'efficienza dei Dispositivi di Protezione Individuali dalle Radiazioni X⁽¹⁰⁾.

Queste indicazioni sono state recepite da alcune Nazioni, quali l'Australia⁽¹¹⁾ ed il Canada⁽¹²⁾, ma non sono ancora presenti nel nostro ordinamento.

Va sottolineato che le Survey, descritte in letteratura, hanno evidenziato, in occasione della prima applicazione del controllo⁽¹³⁾, un alto tasso di non conformità, che successivamente cala vistosamente fino a raggiungere, a regime, i pochi punti percentuali.

L'Esperto Qualificato, coerentemente con il disposto normativo⁽¹⁴⁾, deve procedere a programmare e realizzare il controllo periodico dei singoli DPI.

Il Legislatore non ha stabilito né la periodicità né le modalità di questo controllo. Va però ricordato che la norma tecnica⁽⁷⁾ richiede al Costruttore di indicare esplicitamente all'utente, nella documentazione, quale deve essere la periodicità minima prevista per il suo prodotto.

Non tutti gli autori rappresentano la necessità di un controllo sistematico mediante esposizione ai raggi X di tutti i dispositivi e, viste anche le indicazioni formulate da alcuni Paesi⁽¹¹⁾⁽¹²⁾, si può ritenere che il Protocollo dovrebbe prevedere, sempre, il periodico controllo visivo e tattile del singolo DPI e, nel caso in cui si sospetti la presenza di fratture o disomogeneità, quello mediante l'esposizione a radiazione ionizzante (Scopia, Grafia o TC).

Al momento è possibile reperire in letteratura almeno tre criteri di non idoneità:

1. tutti i Camici e i Collarini per la protezione della Tiroide che presentano una o più "crepe" dello strato protettivo. Questo non si applica nel caso di presenza di piccolissimi fori, a meno che non ve ne siano molti all'interno della stessa specifica area⁽¹⁵⁾.
2. tutti i Camici⁽¹¹⁾ che presentano un difetto con area superiore a 15 mm², se posto in corrispondenza di organi vitali. Se la frattura non è collocata in corrispondenza di organi vitali e l'area è inferiore o uguale a 670 mm² è possibile continuare ad impiegare i Camici, segnalando il difetto e ponendoli sotto osservazione con una periodicità di controllo maggiore. Per quanto attiene i collarini per la protezione della Tiroide la soglia di non idoneità è fissata per difetti con area almeno pari a 11 mm².
3. tutti i Camici⁽¹²⁾ che presentano buchi e/o crepe con area aggregata superiore a 1000 mm² per la protezione del corpo intero, 20 mm² per gli organi riproduttivi e 100 mm² nella regione del collo (se si tratta di camici con protezione della tiroide incorporata). I Collarini per la protezione della tiroide sono non idonei in caso di fratture o buchi caratterizzati da un'area complessiva pari ad almeno 3 mm².

Gli autori di questi ultimi due criteri, basano la propria proposta su di una analisi costo - beneficio inteso come detrimento associato all'aumento di dose vs costo della sostituzione del DPI⁽¹⁶⁾⁽¹²⁾.

5 - MODALITÀ DI CONSERVAZIONE E PULIZIA

La non corretta manipolazione e/o conservazione di questi Dispositivi può portare alla formazione di abrasioni e fessurazioni del materiale schermante e, quindi, alla loro non idoneità.

Va evidenziato che esistono prodotti specifici per la corretta conservazione e che le tecniche di manipolazione sono abbastanza intuitive.

Per esempio, in caso di trasporto, il DPI dalle Radiazioni X non va piegato ma arrotolato al fine di evitare screpolature.

Va infine sottolineato che:

- la periodica pulizia dei DPI contribuisce anche alla rimozione dei batteri dalla loro superficie e, quindi, aiuta nel controllo delle infezioni.
- i Produttori hanno l'obbligo di indicare, nel manuale dell'utilizzatore, i procedimenti di pulizia ammessi e le attenzioni da adottare.

6 - IDENTIFICAZIONE DEI DPI

Da quanto sin qui esposto risulta evidente la necessità di una adeguata identificazione dei singoli DPI.

Questo semplifica in modo più o meno marcato, in funzione delle scelte adottate e della complessità delle articolazioni aziendali, il processo di monitoraggio e controllo dell'uso dei Dispositivi di Protezione da parte del singolo lavoratore e agevola, il Datore di Lavoro, nel fornire l'evidenza dell'avvenuta consegna ai lavoratori dei necessari Dispositivi di Protezione.

Non sempre l'etichettatura apposta dal fabbricante favorisce l'identificazione univoca del Dispositivo e l'implementazione di un sistema di gestione efficace ed efficiente. Questo rende necessaria l'adozione di soluzioni personali, più o meno "tecnologicamente avanzate", che non devono però alterare le caratteristiche qualitative, in primo luogo radioprotezionistiche, del DPI.

In sede di progettazione è opportuno privilegiare scelte che non solo semplifichino l'azione di controllo, da parte del personale preposto, ma anche facilitino il riconoscimento del Dispositivo da parte degli utilizzatori.

7 - FORMAZIONE, INFORMAZIONE E ADDESTRAMENTO SULL'USO CORRETTO

I Dispositivi di Protezione Individuali dalle Radiazione X sono ricompresi tra i DPI di terza categoria, di cui al D.Lgs.81/2008. L'addestramento dei lavoratori risulta, quindi, obbligatorio nell'ambito dello specifico percorso formativo.

Al di là del disposto normativo, va ricordato che l'uso di questi Dispositivi può rendere il lavoro più faticoso e complesso, pertanto è possibile che vi sia una qualche resistenza all'impiego sistematico dei suddetti dispositivi.

Allo stesso modo, come è già stato rappresentato, la conservazione o la pulizia non conforme a quanto indicato dal costruttore ne può causare il degrado e la conseguente non idoneità all'uso.

Per questo la formazione/informazione e addestramento e la successiva verifica dell'applicazione delle procedure, costituiscono momenti fondamentali del processo di organizzazione e gestione della sicurezza a cui il Datore di Lavoro deve assolvere per mezzo dell'Esperto Qualificato e delle altre figure previste dal Legislatore.

8 – CONCLUSIONI

Dall'analisi effettuata dovrebbe risultare evidente l'importanza, per il Datore di Lavoro, di dotarsi di una Procedura di gestione dei Dispositivi di Protezione Individuali anti X che regoli il comportamento delle figure coinvolte nelle attività di valutazione dei rischi, di scelta dei dispositivi, di distribuzione, di gestione e di controllo del loro corretto impiego.

L'implementazione di una procedura di questo tipo consente di:

- ✓ garantire una scelta adeguata dei DPI;
- ✓ assicurare la distribuzione, ad ogni lavoratore, dei DPI che gli competono;
- ✓ verificare periodicamente lo stato ed il corretto uso dei DPI forniti.

9 – BIBLIOGRAFIA

- (1) Optimizing non-Pb radiation shielding materials using bilayers - J. P. McCaf-frey et al. Med. Phys. 36 (12), December 2009
- (2) Shielding properties of lead-free protective clothing and their impact – H. Schlattl et al. Med. Phys. 34 (11), November 2007
- (3) On the (f)utility of measuring the lead equivalence of protective garments - A. Kyle Jones et al. Med. Phys. 40 (6), June 2013
- (4) X-Ray Protective Clothing: Does DIN 6857-1 Allow an Objective Comparison Between Lead-Free and Lead-Composite Materials? - H. Eder et al. Fortschr Röntgenstr 2010; 182: 422-428
- (5) Valutazione delle proprietà fisiche e chimiche dei camici anti-X reperibili sul mercato italiano – Cecchini et al. Atti Convegno Nazionale di Radioprotezione Sicurezza e Qualità in Radioprotezione 1-3 Ottobre 2007;
- (6) Radiation attenuation by lead and nonlead materials used in radiation shielding garments - J. P. McCaffrey et al. Med. Phys. 34 (2), February 2007
- (7) CEI EN 61331-3
- (8) Lead equivalence of x-ray protective garments: Measurement and validation - J Crocker et al. - *Hunter New England Imaging, New South Wales, Australia* - Journal of Medical Imaging and Radiation Oncology and Journal of Medical Radiation Sciences - 2014 Combined Scientific Meeting
- (9) CEI EN 61331-1
- (10) Aprons to Protect Against Penetrating Radiation RADIATIONS - Personal Protective Equipment – PRTM 5 – IAEA 2004

- (11) Policy on x-ray protective clothing - State of NSW and Environment Protection Authority – Sydney April 2014
- (12) Rejection Criteria for defects in lead apparel used for radiation protection of x-ray workers – BC Centre for Disease Control – Environmental Health Services - Vancouver January 2014
- (13) How protective are the lead aprons we use against ionizing radiation? – O. Oyar et al. – Diagn. Interv. Radiol. 18:147–152 2012
- (14) Comma 1 lettera b dell'art. 791 D.lgs. 230/95 e s.m.i.
- (15) Ionising Radiation Safety - Mid Essex Hospital Services NHS - October 2014
- (16) Inspection of lead aprons: criteria of rejection - Lambert et al. Health Phys 80 (Suppl 2):S67–S69; 2001

STIMARE IL RISCHIO DI ESPOSIZIONE DEI LAVORATORI AL RADON NEI LUOGHI DI LAVORO ALLA LUCE DELL'ATTUALE REGOLAMENTAZIONE E DELLE PROSPETTIVE FUTURE

Rosabianca Trevisi, Federica Leonardi

INAIL - DiMEILA - Laboratorio Rischio Agenti Cancerogeni e Mutageni

1 – INTRODUZIONE

Con la Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea del 17 gennaio 2014 è stata pubblicata la Direttiva 2013/59/EURATOM del Consiglio del 5 dicembre 2013 [1], inerente le nuove norme fondamentali in materia di protezione dalle radiazioni ionizzanti. Si tratta di una Direttiva molto "attesa", anche perché va ad abrogare e sostituire 5 direttive precedenti: le Direttive 89/618/Euratom [2], 90/641/Euratom [3], 96/29/Euratom [4], 97/43/Euratom [5] e 2003/122/Euratom [6].

Il cammino che questo testo ha percorso ha preso avvio a partire dalla pubblicazione nel 2007 della Raccomandazione dell'ICRP n.103 [7], che di fatto ha proposto un nuovo sistema di protezione radiologica superando lo schema precedente – che suddivideva le attività lavorative con le radiazioni ionizzanti in due categorie, "pratiche" ed "interventi", passando a considerare le attività lavorative con impiego di sorgenti di radiazioni ionizzanti quali "situazioni di esposizione" configurabili come "pianificate", "esistenti" o "di emergenza" a seconda delle modalità. Nel caso delle sorgenti naturali di radiazioni, e del radon in particolare, le "situazioni di esposizione" sono considerate "esistenti", ovvero come una situazione di esposizione già presente al momento in cui deve essere adottata una decisione sul suo controllo e per la quale non è necessaria o non è più necessaria l'adozione di misure urgenti.

Alla luce delle novità introdotte dall'ICRP n.103, il Gruppo di Esperti dell'Art.31 del Trattato Euratom ha predisposto una proposta di nuova Direttiva [8], che è stata accolta dalla Commissione Europea nel settembre 2011, avviando di fatto il cammino terminato con la pubblicazione della Direttiva 2013/59/Euratom: a partire dalla data di emanazione, gli Stati Membri hanno 4 anni di tempo per recepirli negli ordinamenti nazionali, anche se la proposta della Commissione Europea è di ridurre il tempo di recepimento a 2 anni.

Per comprendere le novità introdotte dalla Direttiva 2013/59/Euratom [1] in relazione al radon, è necessario avere ben presente cosa fosse previsto in precedenza, nella Direttiva 96/29/Euratom [4]. Questa Direttiva, dal nostro punto di vista, ha avuto il merito di aver introdotto per la prima volta dei requisiti per controllare l'esposizione alle sorgenti naturali di radiazioni ionizzanti (radon,

NORM, radiazione cosmica) almeno in relazione alla protezione dei lavoratori. Tutto ciò era affrontato nel Titolo VII che, tuttavia, considerava l'esposizione alle sorgenti naturali separatamente rispetto al sistema generale di protezione dalle radiazioni.

Per quanto riguardava la protezione dei lavoratori dall'esposizione al radon, questa era trattata in due articoli (art. 40 e 41), nei quali si chiedeva agli Stati Membri di identificare le attività lavorative di interesse e di identificare opportune modalità di "intervento" o, in alternativa, idonei sistemi di controllo qualora fossero state intese come "pratiche", senza tuttavia entrare ulteriormente nel merito ad esempio definendo uno strumento utile a realizzare tale identificazione. Pertanto a supporto del recepimento del Titolo VII, fu elaborata la Guida Tecnica "Radiation Protection 88" (nel seguito RP88) [9]. In questo documento si suggeriva il "livello di azione" quale strumento atto ad identificare le attività lavorative di interesse e per stabilire anche quando queste dovessero essere considerate come *pratiche* o *interventi*. Si raccomandò agli Stati Membri di scegliere un livello di azione all'interno di un intervallo pari a 500-1000 Bq/m³, da intendersi come concentrazione media annua di radon in aria. Tale intervallo era già più stretto rispetto a quello raccomandato dall'ICRP 65 [10] - documento di riferimento per l'elaborazione della Direttiva in materia di radon - pari 500-1500 Bq/m³.

Si vuole ricordare che nel recepimento della Direttiva 96/29/Euratom [4] l'Italia preferì avere un approccio protettivo adottando quale livello di azione nazionale l'estremo inferiore dell'intervallo, ossia 500 Bq/m³.

2 - PRINCIPALI NOVITÀ INTRODOTTE DALLA DIRETTIVA 2013/59/EURATOM IN MATERIA DI RADON

Dalla Direttiva 96/29/Euratom è passato molto tempo e si dispone di molte nuove conoscenze relativamente ai rischi sanitari associati all'esposizione prolungata al radon [11], per cui con la nuova Direttiva si è potuto definire un sistema di controllo in modo più integrato e sistematico.

Per queste ragioni nella nuova Direttiva la protezione dalle sorgenti naturali di radiazioni ionizzanti viene considerata ed integrata all'interno dell'intero *corpus*, pur mantenendo delle proprie specificità e una notevole flessibilità: è facile trovare numerosi riferimenti alla protezione dal radon in molti articoli del testo normativo. Poiché tra le peculiarità del radon spicca la sua presenza ubiquitaria, la nuova Direttiva ha considerato e regolamentato sia l'esposizione al radon dei lavoratori negli ambienti di lavoro che l'esposizione della popolazione degli ambienti di vita, differenti non dal punto di vista degli effetti sulla salute ma dell'apparato regolatorio applicabile. In tal modo la nuova Direttiva non solo ha aggiornato ed integrato quanto previsto nella Direttiva 96/29/Euratom [4], ma anche quanto riportato nella Raccomandazione 90/143/Euratom relativa alla protezione dal radon negli ambienti chiusi (abitazioni) [12].

La regolamentazione dell'esposizione al radon sia dei lavoratori che della popolazione necessita che gli interventi in entrambe le situazioni rientrino all'interno di un quadro organico, quindi di una programmazione generale realizzata a livello nazionale: per tale motivo la nuova Direttiva considera necessario che gli Stati

Membri si dotino di un “Piano d'azione per il radon”, del quale la Direttiva stessa delinea una serie di argomenti da considerare (vedi art.103 e Allegato XVIII “*Elenco di elementi da considerare nell'elaborazione del piano d'azione nazionale per affrontare i rischi di lungo termine derivanti dall'esposizione al radon di cui agli articoli 54, 74 e 103*”).

3 - ESPOSIZIONE AL RADON DEI LAVORATORI NEGLI AMBIENTI DI LAVORO

L'apparato regolatorio relativo alla protezione dei lavoratori dall'esposizione al radon nei luoghi di lavoro è affrontato principalmente negli art. 35 e 54. In essi si afferma la necessità che gli Stati Membri definiscano un “livello di riferimento” nazionale, espresso in termini di concentrazione media annua di radon in aria.

Il passaggio dal livello di azione al livello di riferimento è già di per sé un cambiamento profondo di approccio alla protezione dal radon.

Per “livello di azione” tipicamente si intende un livello oltre il quale occorre intervenire (ossia l'attività lavorativa in oggetto entra nel sistema di radioprotezione e viene classificata come “intervento”) ma al di sotto del quale non è previsto si faccia nulla.

Diversamente il “livello di riferimento” è un livello oltre il quale si ritiene inappropriato permettere che si verifichino esposizioni e al di sotto del quale è possibile mettere in atto il principio di ottimizzazione della protezione. Non è comunque da intendersi come un “limite”, che invece non può essere in alcun modo superato.

Mentre la Direttiva 96/29/Euratom [4] non proponeva alcun valore di concentrazione e la Guida Tecnica RP88 [9] suggeriva un ampio intervallo di concentrazioni entro il quale scegliere il proprio livello di azione, la nuova Direttiva invece, non solo afferma la necessità che gli Stati Membri dispongano di un livello di riferimento nazionale, ma fissa anche che non sia superiore a 300 Bq/m³. Tutto ciò a meno che nello Stato non prevalgano circostanze particolari, nel qual caso è fatto obbligo di informare la Commissione di questa scelta; questa opportunità è un esempio della “flessibilità” di cui si faceva cenno.

Tale valore massimo si applica sia ai luoghi di lavoro di nuova costruzione, che a quelli esistenti ed è lo stesso proposto per gli ambienti di vita, per gli edifici ad elevato fattore di occupazione (vedi ospedali, collegi, ecc.) e per gli edifici con accesso del pubblico (ad esempio le scuole): la scelta di un valore unico, forse non particolarmente protettivo nel caso delle abitazioni, comporta di per sé una semplificazione nell'applicazione, tenuto conto anche dell'esperienza di questi anni che ha evidenziato la difficoltà e la complessità nel doversi confrontare con livelli diversi nel caso di un edificio avente al suo interno ambienti con diverse destinazioni d'uso (ambienti di lavoro e ambienti di vita).

La Direttiva prevede tuttavia anche la possibilità che uno Stato Membro definisca più di un livello di riferimento ad esempio nel caso di edifici con modalità diverse di utilizzo (ad esempio edifici solo con lavoratori, edifici con accesso del pubblico, scuole ecc.) oppure tenendo conto del fatto che siano luoghi di lavoro esistenti o di nuova costruzione: anche questa opportunità rientra nella flessibilità di cui gli Stati

membri possono usufruire nel definire l'apparato regolatorio nazionale in relazione al radon.

Il valore prescelto poi, è ben al di sotto sia del limite definito dalla IAEA [13], pari a 1000 Bq/m^3 , che dell'intervallo proposto nella precedente Direttiva e tiene conto della profonda revisione che l'ICRP sta facendo relativamente ai fattori convenzionali di conversione per la stima della dose: è da ricordare infatti che la Direttiva 96/29/EURATOM e la Guida Tecnica RP 88 per la stima della dose efficace da radon si avvalevano dei fattori convenzionali di conversione pubblicati nell'ICRP65 [10] (gli stessi presenti anche nell'ICRP60 [14]). Ma già nel 2009, l'ICRP con lo *"Statement on radon"* [15], date le recenti evidenze scientifiche ed epidemiologiche, affermava la necessità di avviare una profonda revisione dei valori di tali fattori anticipando che in futuro sarebbero stati "almeno il doppio" rispetto a quelli al momento in uso.

In realtà nel seguito l'ICRP ha elaborato una nuova Raccomandazione, che adotta un approccio dosimetrico alla stima della dose ai lavoratori da diversi nuclidi, tra i quali anche il radon. Il testo in bozza è disponibile da diversi mesi sul sito dell'ICRP (www.icrp.org) [16], pertanto si è dovuto necessariamente tenere conto dei suoi contenuti anche nella stesura della Direttiva. In questo documento il valore del fattore convenzionale di conversione relativo alla dose di radon è in realtà quadruplicato rispetto a quello dell'ICRP 65 [10] e fa sì che la posizione dell'ICRP si allinei a quella delle altre organizzazioni internazionali, quali IAEA [17] e UNSCEAR [18], che già da tempo proponevano valori del fattore di conversione più elevati.

Anche il valore del livello di riferimento (300 Bq/m^3) è in linea quindi con quanto previsto dall'ICRP in questo documento laddove è ritenuto come primo elemento dell'approccio graduato da applicare all'esposizione al radon nei luoghi di lavoro.

Per queste ragioni legate a un quadro di riferimento del sistema di radioprotezione in notevole evoluzione, la Direttiva non riporta alcun valore dei coefficiente convenzionali di conversione: in tal modo, quando tali valori dovessero cambiare, il livello di riferimento proposto in termini di concentrazione di radon non ne risulterebbe condizionato.

La Direttiva prevede anche la possibilità che lo Stato Membro definisca più di un livello di riferimento ad esempio per edifici con modalità diverse di utilizzo (ad esempio edifici solo con lavoratori, edifici con accesso del pubblico, scuole ecc.) oppure tenendo conto del fatto che siano luoghi di lavoro esistenti o di nuova costruzione: anche questa opportunità rientra nella flessibilità di cui gli Stati membri possono usufruire nel definire l'apparato regolatorio nazionale in relazione al radon.

4 - IL CONTROLLO DELL'ESPOSIZIONE AL RADON NEI LUOGHI DI LAVORO

La Direttiva 2013/59/Euratom chiede agli Stati Membri che siano eseguite misurazioni della concentrazione media di radon negli ambienti di lavoro al pianterreno o a livello seminterrato (diversamente dalla precedente Direttiva che considerava solo i luoghi di lavoro interrati), se ubicati in zone di interesse (ex "radon prone areas", vedi in seguito) oppure in alcune specifiche tipologie di

ambienti di lavoro ritenute di particolare interesse, che vengono identificate nell'ambito delle attività condotte dal "Piano d'azione per il radon".

Laddove la misurazione della concentrazione media di radon fornisca valori superiori al livello di riferimento si richiede di mettere in atto interventi di risanamento.

Qualora questi non fossero sufficienti, ovvero si avesse il superamento di 6 mSv/anno come dose efficace ricevuta dai lavoratori o il corrispondente valore in termini di esposizione integrata al radon, è richiesto che tali attività lavorative siano considerate come "situazioni di esposizione pianificate" (vedi "pratiche") con gli adempimenti previsti (art.25), quali la notifica. In alternativa a questa misura gli Stati membri potrebbero richiedere che le esposizioni siano tenute sotto costante controllo.

A proposito del concetto di "radon prone areas", la Direttiva 2013/59/Euratom introduce una nuova definizione, per cui nel nuovo testo normativo sono da intendersi come "radon prone areas" quelle "zone in cui si prevede che la concentrazione di radon (come media annua) superi il pertinente livello di riferimento nazionale in un numero significativo di edifici" (art. 103.3). Tale definizione è tutt'altro che banale da attuare nella realtà del territorio nazionale e apre questioni complesse come la scelta di quale sia "numero significativo di edifici" piuttosto che un valore percentuale.

Un ultimo argomento nuovo della Direttiva consiste nel fatto che -nello stabilire lo schema di controllo dell'esposizione al radon- si richiede di tenere conto anche di programmi relativi ad aspetti che con il radon possono interagire/interferire, ad esempio il fumo di tabacco, il risparmio energetico, la qualità dell'aria interna: questa richiesta della UE va nell'ottica dell'armonizzazione e dell'approccio coerente ed integrato dei diversi programmi, spesso elaborati in contesti differenti.

5 - CONCLUSIONI

La Direttiva 2013/59/Euratom relativamente al radon apre un nuovo scenario, molto più ampio ed articolato rispetto ai precedenti.

Le novità introdotte sono moltissime e l'impatto sarà notevole. L'introduzione di adempimenti sia relativamente agli ambienti di vita che a quelli di lavoro consentirà di disporre di un approccio integrato e di una maggiore protezione.

L'ampia flessibilità consentita agli Stati Membri è volta a garantire uno standard minimo di protezione comune a tutti e la possibilità di adottare politiche stringenti laddove possibile, tenuto conto della situazione economica e sociale, nonché delle politiche precedenti.

Il tempo a disposizione per il recepimento (4 anni) sarà necessario a chiarire i vari aspetti considerati, anche allo scopo di delineare le politiche più efficaci dal punto di vista dei costi e dei benefici in termini di salute pubblica e che –per quanto attiene l'applicazione in Italia– tengano conto dell'esperienza maturata con l'adozione del Decreto Legislativo n.241/00.

6 – BIBLIOGRAFIA

- [1] Direttiva 2013/59/Euratom del Consiglio del 5 dicembre 2013, che stabilisce norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione contro i pericoli derivanti dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti, e che abroga le direttive 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom e 2003/122/Euratom. GUCE, L13/1 del 17/01/2014.
- [2] Direttiva 89/618/Euratom del Consiglio, del 27 novembre 1989, concernente l'informazione della popolazione sui provvedimenti di protezione sanitaria applicabili e sul comportamento da adottare in caso di emergenza radioattiva. GUCE, L357 del 7/12/1998.
- [3] Direttiva 90/641/Euratom del Consiglio, del 4 dicembre 1990, concernente la protezione operativa dei lavoratori esterni esposti al rischio di radiazioni ionizzanti nel corso del loro intervento in zona controllata.
- [4] Direttiva 96/29/Euratom del Consiglio del 13 maggio 1996 che stabilisce le norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i pericoli derivanti dalle radiazioni ionizzanti. GUCE, L159 (1996).
- [5] Direttiva 97/43/Euratom del Consiglio del 30 giugno 1997 riguardante la protezione sanitaria delle persone contro i pericoli delle radiazioni ionizzanti connesse a esposizioni mediche.
- [6] Direttiva 2003/122/Euratom del Consiglio del 22 dicembre 2003 sul controllo delle sorgenti radioattive sigillate ad alta attività e delle sorgenti orfane.
- [7] International Commission on Radiological Protection, 2007. The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37(2-4), 1-332 (2007).
- [8] Opinion of the Group of Experts established under Article 31 of the Euratom Treaty on the Revised Basic Safety Standards for the protection of the health of workers and the general public against the dangers arising from ionising radiation (24 February 2010).
http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radiation_protection/article_31_en.htm
- [9] European Commission, 1997. Recommendations for the implementation of Title VII of the European Basic Safety Standards Directive (BSS) concerning significant increase in exposure due to natural radiation sources. Radiat. Prot. 88, 1-32.
http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radiation_protection/publications_en.htm
- [10] International Commission on Radiological Protection, 1993. Protection Against Radon-222 at Home and at Work. ICRP Publication 65. Ann. ICRP 23 (2).
- [11] Darby, S., Hill, D., Auvinen, A., Barros-Dios, J. M., Baysson, H., Bochicchio, F., Døo, H., Falk, R., Forastiere, F., Hakama, M. et al., 2005. Radon in homes and lung cancer risk: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. Br. Med. J. 330, 223-226.
- [12] European Commission. Commission recommendation of 21 February 1990 on the protection of the public against indoor exposure to radon. Official J. Eur. Commun. No. L 80/26 (1990).

- [13] International Atomic Energy Agency, 2011. Protection of the public against exposure indoors due to radon and other natural sources of radiation. Safety Standard No. DS421. www-ns.iaea.org/standards/documents/dsnumber-list.asp.
- [14] International Commission on Radiological Protection, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21 (1-3).
- [15] International Commission on Radiological Protection, 2010. Statement on radon. Approved on November 2009. ICRP Publication 115, Part 2, Ann. ICRP 40 (1), 61-64. www.icrp.org/consultation_page.asp.
- [16] International Commission on Radiological Protection (ICRP). Occupational Intakes of Radionuclides, Part 3. <http://www.icrp.org/page.asp?id=169>.
- [17] International Atomic Energy Agency, 2011. Protection of the public against exposure indoors due to radon and other natural sources of radiation. Safety Standard No. DS421. www-ns.iaea.org/standards/documents/dsnumber-list.asp.
- [18] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2006 Report: Effects of ionizing radiation, Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume II, Annex E: Sources-to effects assessment for radon in homes and workplaces. United Nations (2009).



**Esperienze,
Approfondimenti e
Ricerche**



BONIFICA ACUSTICA LOCALE TESSITURA E CONTROLLO ATTIVO DEL RUMORE DI UNO SCARICO COMPRESSORE

Piero Calfa, Alessandro Bonaldo

Bosco Italia Spa – San Mauro Torinese (TO)

1 – PREMESSA

In questo lavoro saranno brevemente descritti l'approccio e la combinazione degli interventi di bonifica acustica che hanno riguardato sia il reparto produttivo di una tessitura, mediante l'installazione di un trattamento ambientale, sia lo scarico di un compressore che fornisce aria compressa ai telai necessaria per il loro funzionamento, mediante l'impiego di un controllo attivo sul rumore.

2 – PRESENTAZIONE DELL'ANALISI ED ELABORAZIONE DEI DATI RACCOLTI

Laddove la tipologia di una sorgente o la tipologia di lavorazione svolta dalla stessa non consente di intervenire direttamente su di essa, in un reparto produttivo si può ricorrere ad un sistema di fonoassorbimento ambientale.

Il vantaggio di questa tecnica è quella appunto di non prevedere interventi diretti sulle sorgenti, ma consentire ugualmente di attenuare il livello di pressione sonora globale all'interno di un volume definito, attraverso la riduzione dei fenomeni di riverberazione e di riflessione tipici dell'ambiente in esame.

La riverberazione è il fenomeno fisico per cui, una sorgente posta in un ambiente chiuso, per effetto delle riflessioni generate dalle superfici (pareti, soffitti, pavimenti) viene notevolmente amplificata.

Più semplicemente le sorgenti poste in campo libero (all'aperto) e in completa assenza di ostacoli riflettenti, generano livelli di pressione sonora decisamente più bassi di quelli generati in campo riverberato (all'interno di un volume definito).

In campo riverberato si avrà cioè la situazione acustica rappresentata dallo schema di pagina seguente.

RUMORE PROPRIO DELLA SORGENTE (rumore misurato in campo libero) + RUMORE RIVERBERATO (incremento dovuto alle riflessioni delle superfici che delimitano il locale) = RUMORE EFFETTIVO
--

Per ridurre quella parte di energia sonora amplificata dalle superfici che delimitano il locale, è necessario acquisire sperimentalmente i seguenti valori:

- Tempo di riverbero (T_{60})

Tempo impiegato (in secondi) dal livello di pressione sonora per decrescere di 60 dB dopo l'interruzione di un segnale acustico.

La prova viene eseguita utilizzando un segnale campione prodotto da una sorgente calibrata rilevando il T_{60} in tutte le frequenze comprese tra 125 Hz e 8000 Hz.

- Decadimento della pressione sonora con la distanza

La misura viene eseguita utilizzando una sorgente calibrata misurando il livello di pressione sonora ad intervalli di un metro di distanza dalla stessa.

Successivamente si può procedere al calcolo delle unità fonoassorbenti da inserire nell'ambiente e necessarie per ottenere le attenuazioni richieste attraverso le seguenti formule:

$$T_{60} = \frac{0.163}{\alpha * S} \quad \text{Metodo Sabine con } \alpha < 0.2$$

$$T_{60} = \frac{0.163}{S * \ln\left(\frac{1}{1 - \alpha}\right)} \quad \text{Metodo Eyring con } \alpha > 0.2$$

$$\text{Decadimento} = 10 * \log\left(\frac{1}{4 * \pi * D^2} + \frac{f_1(\alpha)}{f_2(d, \alpha)}\right)$$

dove f_1 e f_2 sono funzioni ricavate sperimentalmente.

Ultimamente grazie all'utilizzo di software di calcolo, si possono elaborare modelli previsionali, che simulano con maggiore precisione la situazione acustica ottenibile dopo gli interventi di insonorizzazione.

Il principio di funzionamento del software è il metodo ray-tracing.

Il metodo consente di elaborare un numero molto elevato di algoritmi di calcolo, interagendo contemporaneamente con l'archivio di dati raccolti sperimentalmente durante i collaudi o durante i test effettuati presso laboratori sui prodotti di nostra produzione.

I risultati sono di facile lettura in quanto vengono rappresentati su mappe cromatiche, sovrapponendo il lay.out del reparto produttivo.

Nel caso in oggetto, si è eseguito un calcolo previsionale in cui abbiamo tenuto conto di:

- esigenze di manutenzione del Cliente;
- impianti e ingombri esistenti;
- tipologia dei materiali che costituiscono il locale in cui dovrà essere inserito il trattamento ambientale;
- tipologia delle sorgenti e relativa emissione.

Partendo dal modello tarato con i dati raccolti in campo, si è calcolata l'attenuazione ottenibile inserendo nel progetto il sistema di insonorizzazione che si è pensato di adottare, costituito da prodotti da noi ingegnerizzati e realizzati con caratteristiche note ricavate in laboratorio.

Il risultato ottenuto costituisce la **garanzia contrattuale**.

Di seguito riportiamo in **Tabella 1** il confronto tra i valori di livello di pressione sonora (Lps) rilevati durante la campagna di misura pre-intervento, i valori previsti dal calcolo dopo l'inserimento del trattamento fonoassorbente ed il valore riscontrato durante il collaudo.

Tabella 1: livelli di pressione sonora ante e post intervento misurati all'interno del reparto di tessitura

Posto operatore	Lps pre intervento	Lps calcolato dopo intervento	Valore misurato dopo intervento
1	89.3	85.0	84.4
2	92.2	86.5	85.7
3	93.8	87.0	85.9
4	92.9	86.5	85.2
5	92.0	84.0	81.0
6	90.8	83.5	81.8
7	91.3	84.0	81.2
8	87.1	82.5	81.9
9	85.1	82.5	81.1

In **Tabella 2** è invece riportato il confronto tra i valori del T_{60} rilevati prima e dopo l'inserimento del trattamento fonoassorbente ambientale.

Tabella 2: valori del T_{60} Pre e Post intervento

3 – DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO ALL'INTERNO DEL REPARTO PRODUTTIVO

L'intervento proposto è costituito da un particolare rivestimento fonoassorbente piano installato a soffitto composto da elementi in alluminio forato e grecato equipaggiati con materiali fonoassorbenti.

Gli elementi fonoassorbenti sono tenuti in posizione da un'orditura principale appesa alla soletta, mediante tiranti e piastre dimensionate per reggere il carico complessivo, su cui viene fissata l'orditura secondaria realizzata in acciaio che costituisce il telaio di contenimento vero e proprio degli elementi fonoassorbenti.

All'interno della stessa struttura di contenimento della pannellatura fonoassorbente sono stati inseriti i corpi illuminanti a led, così da rendere uniforme ed esteticamente omogeneo l'intervento di mitigazione acustica.

I pannelli fonoassorbenti impiegati nell'intervento sopra descritto, sono denominati Ekokit 300/A ®, realizzati in lega di alluminio pre-verniciata con primer sui due lati e vernice a finire sul lato a vista di colore bianco.

La superficie piana dell'elemento Ekokit ha una percentuale di foratura superiore al 35% vuoto su pieno, ottenuta mediante la perforazione della lamiera con 6 diametri differenti per ottenere un range più ampio delle frequenze assorbite.

All'interno del guscio metallico sono presenti due strati di materiale fonoassorbente in lana di vetro di spessore pari a 30 mm, aventi differente densità, Entrambi gli strati sono protetti da un tessuto non tessuto di colore nero.



Figura 1: interventi acustici previsti e realizzati all'interno del reparto



Figura 2: interventi acustici previsti e realizzati all'interno del reparto

4 – DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO ALL'INTERNO DEL LOCALE TECNICO

A servizio della produzione vi è un compressore Robuschi RVT 90/V installato all'interno di un locale tecnico confinante con il locale produttivo sopra descritto.

Tabella 3: caratteristiche del compressore

Tipologia Installazione	Aspirazione Compressore
Casa Costruttrice	Robuschi RVT 90/V
Regime di rotazione	1450 RPM
Portata	1450 m ³ /h
Tipo azionamento	Motore elettrico
Potenza nominale	16,6 Kw
Tipologia silenziatore	AIS 8"
Numero altoparlanti	3
Controller Box	AIS-2-AC
Scheda controllo elettronico	613 R
Alimentazione - Potenza	AC 220 V – 300W
Sincronizzatore	3 kHz AIS Active –Sync-Sensor
Parametrizzazione	40 – 450 Hz

L'insonorizzazione dello scarico del compressore è stata effettuata mediante l'inserimento di un silenziatore cilindrico Serie V ad assorbimento di tipo passivo e in uscita dallo stesso è stata posizionata l'unità a controllo attivo sul rumore denominato AIS.

Il sistema AIS è costituito da un'unità di controllo che misura il segnale e lo elabora, generando mediante un amplificatore e numero 3 altoparlanti un segnale uguale ma di fase contraria a quella misurata così da ridurne l'effetto.

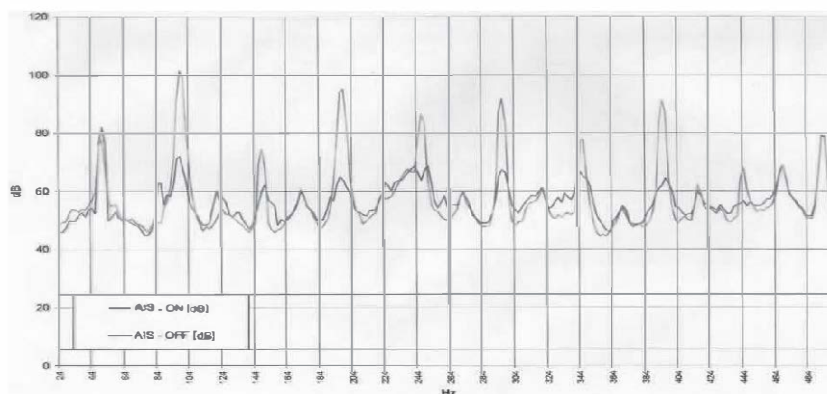


Figura 3: Confronto Lps con Controllo Attivo acceso e spento

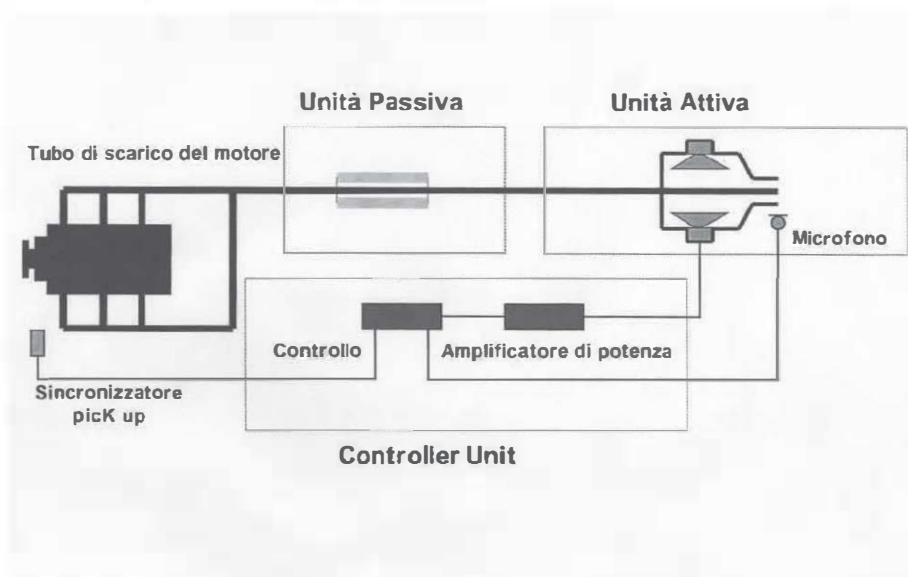


Figura 4: rappresentazione grafica del controllo attivo sul rumore AIS

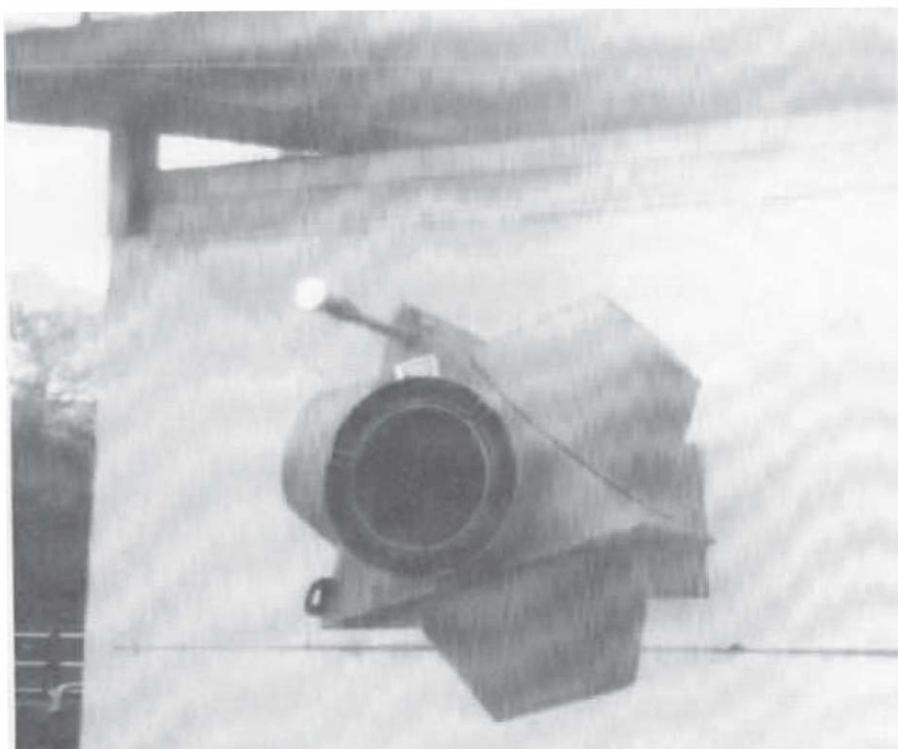


Figura 5: silenziatore attivo su scarico compressore

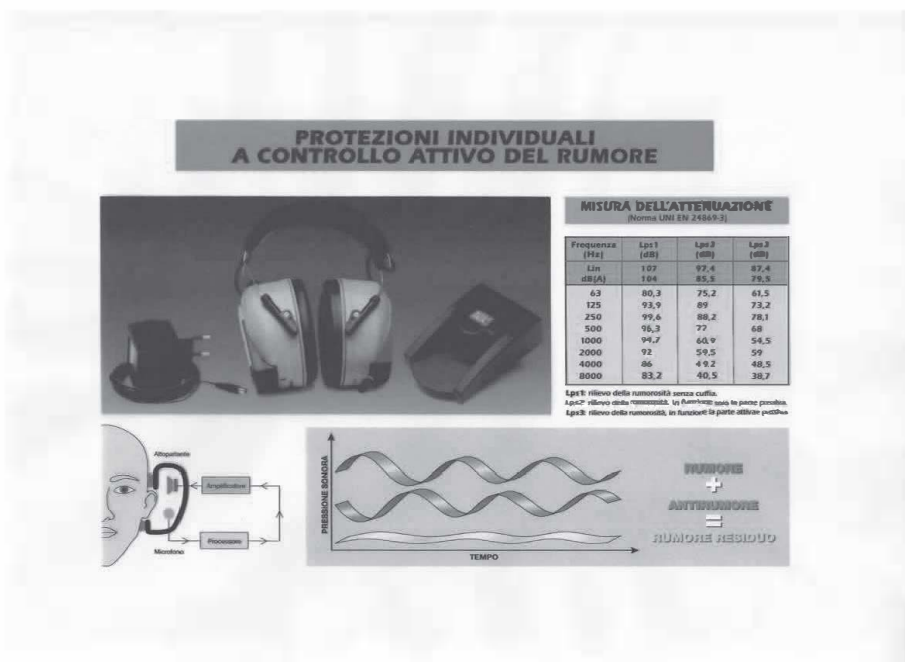


Figura 6: ulteriore applicazione del controllo attivo sul rumore

5 – CONCLUSIONI

La combinazione dei due interventi seppur in locali ben distinti tra loro, ha portato al raggiungimento oltre che degli obiettivi acustici nei reparti trattati, anche di un miglior confort acustico nei locali adiacenti adibiti ad uso ufficio.

Il tutto senza limitare le attività di manutenzione e con un certo tocco estetico dato che si sono potuti nascondere parte degli impianti e tubazioni presenti a soffitto.

STUDIO PILOTA SULLA REALE ATTENUAZIONE DELLE CUFFIE DI PROTEZIONE A CONTROLLO ATTIVO DEL RUMORE

Diego Annesi, Pietro Nataletti, Antonio Moschetto

INAIL, Dipartimento Medicina, Epidemiologia, Igiene del Lavoro e Ambientale, Centro Ricerche Monte Porzio Catone (RM).

1 - INTRODUZIONE

Il laboratorio di acustica del Dipartimento di Medicina, Epidemiologia, Igiene del Lavoro e Ambientale del Centro Ricerche INAIL di Monte Porzio Catone, considerato che sul mercato nazionale e internazionale esistono diverse cuffie definite elettroniche, le quali si basano su diverse tipologie di controllo del rumore [1], ha voluto testare un modello di cuffia di protezione per i lavoratori, la Noise Buster della Pro Tech Technologies americana [2], basata sul principio del controllo attivo del rumore (ANC, *Active Noise Control*). Da una ricerca di mercato effettuata, è risultata una delle pochissime cuffie dichiarate ANC dai costruttori.

L'obiettivo del presente studio è di verificare la reale attenuazione di questa cuffia basata sul controllo attivo del rumore, per valutarne l'efficienza e l'idoneità come dispositivo di protezione individuale dell'udito (DPI-u) per i lavoratori.

2 - MATERIALI E METODI

Tutte le misure, effettuate su due esemplari identici della cuffia, sono state eseguite presso la camera anecoica del Centro Ricerche INAIL di Monte Porzio Catone (RM). In questo ambiente di prova è stato generato, tramite il sine noise generator Brüel & Kjaer type 1049, un segnale rosa (Pink Noise) che è stato riprodotto attraverso la sorgente direzionale Brüel & Kjaer tipo 4224. La sorgente direzionale è stata posta alla distanza di 2 m dal simulatore dell'orecchio e del torso Brüel & Kjaer tipo 4128 (**Figura 1**). L'acquisizione è stata effettuata tramite un fonometro integratore Soundbook, registratore e analizzatore Real Time a 4 canali. Per ciascuna misura sono stati acquisiti il livello equivalente ponderato "A", lo spettro RMS in terzi d'ottava e lo spettro FFT nelle seguenti posizioni (**Figura 2**):

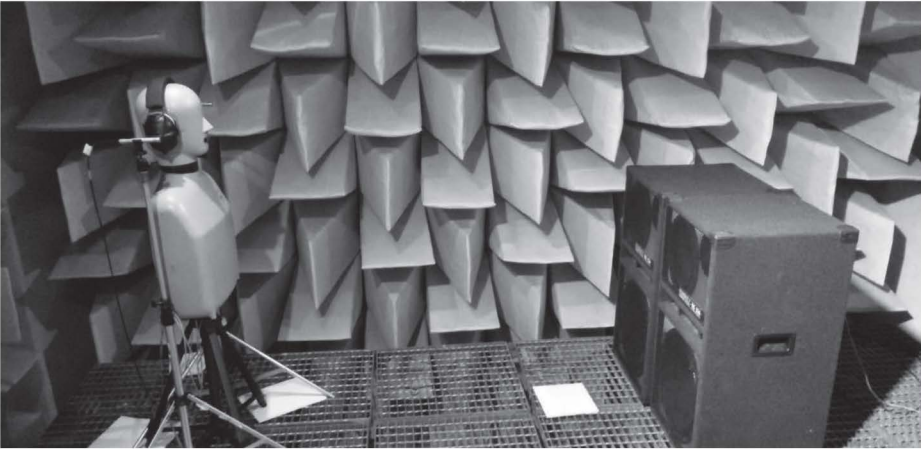


Figura 1: Posizionamento del manichino e delle casse acustiche in camera anecoica

- 1) Interno orecchio destro manichino (Ch1)
- 2) Interno orecchio sinistro manichino (Ch2)
- 3) Esterno orecchio destro manichino allineato alla distanza di 15 cm da questo (Ch3)
- 4) Esterno orecchio sinistro manichino allineato alla distanza di 15 cm da questo (Ch4)

È stato scelto un tempo di misura di 30''. Le cuffie testate, prodotte dalla Pro Tech Technologies, sono modello PA4000 e si avvalgono della tecnologia definita Noise Buster.



Figura 2: Vista della cuffia PA4000 sul manichino e dei microfoni esterni

La cuffia esaminata utilizza un microfono (1) all'interno dei padiglioni auricolari rigidi per rilevare il rumore proveniente dall'esterno (2). Il segnale viene inviato all'elettronica di controllo (3), che lo analizza e lo rielabora, generando un segnale in contro-fase (il cosiddetto "anti-rumore", che viene inviato a un altoparlante (4), che si trova anche esso nella cuffia. Quando le due onde (l'onda di rumore e l'onda di anti-rumore) si incontrano, il rumore che giunge all'orecchio è notevolmente ridotto (5) (Figura 3).

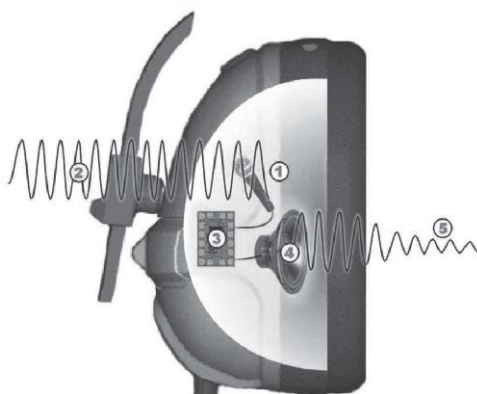


Figura 3: Schema rappresentativo del funzionamento della cuffia PA4000 basata sul controllo attivo del rumore

Active Noise Reduction

ANR performance range: Between 20Hz and 800Hz

ANR attenuation: Up to 20dB

Attenuation Data

NoiseBuster PA4000: ANSI S3.19-1974, testing by Dr. Kevin Michael & Associates, State College, Pennsylvania, USA

Passive Attenuation										NRR	CSA	*Active Noise Reduction Attenuation Additional low frequency Noise Reduction Between 20 & 800 Hz	Up to 20 dB
Frequency, Hz	125	250	500	1000	2000	3150	4000	6300	8000				
Mean Value, dB	17.5	22.3	30.6	37.3	34.7	40.2	44.6	43.7	44.9	26	A		
Std. Deviation	3.1	2.4	2.5	2.7	2.6	2.9	2.4	2.4	3.5				

*Active Noise Reduction (ANR) is the most effective defense against low-frequency noise.

NoiseBuster PA4000: AS/NZS 1270:2002, testing by Dr. Kevin Michael & Associates, State College, Pennsylvania, USA

Passive Attenuation										SLC (30)	29.2 Class 5	*Active Noise Reduction Attenuation Additional low frequency Noise Reduction Between 20 & 800 Hz	Up to 20dB
Frequency, Hz	125	250	500	1000	2000	4000	8000						
Mean Attenuation, dB	16.6	21.7	28.4	35.1	31.7	39.7	40.7						
Std. Deviation	3.9	3.1	4.1	4.1	3.2	4.6	5.1						
Mean - Std. Deviation	12.7	18.6	24.3	31.0	28.5	35.1	35.6						

*Active Noise Reduction (ANR) is the most effective defense against low-frequency noise.

Product Packaging Details

Model/Part No: P-M000

UPC: 768235286001

Product weight: 16 oz. (with battery inserted)

Individual Package dimensions: 9.0" x 8.5" x 4.5"

Individual Package weight: 1 lb., 8oz

Master carton: 8 units

Master carton dimension: 18" x 18" x 10"

Master carton cube: 1.88 cubic feet

Master carton weight: 14.5 lb.

Figura 4: Tabelle dell'attenuazione della cuffia PA4000 certificata dal produttore

Come si può vedere in **Figura 4**, il produttore certifica la cuffia PA4000 per il mercato americano e australiano secondo, rispettivamente, gli standard ANSI S3.19-1974 e AS/NZS 1270:2002. La cuffia sembra quindi non omologata per il mercato europeo, secondo lo standard EN 352, e non risulta marcata CE.

Il costruttore indica i valori medi di attenuazione passiva e la deviazione standard per bande d'ottava tra 125 Hz e 8000 Hz e l'indice semplificato NRR e, in particolare, indica una "Active Noise Reduction Attenuation" in modalità di funzionamento attivo di 20 dB tra 20 Hz e 800 Hz.

3 - RISULTATI

I risultati, inerenti sia alla cuffia "A" e "B", sono riportati nel seguente modo:

- 1) Orecchio manichino nudo;
- 2) Cuffia posizionata in modalità ANC OFF (cuffia esclusivamente passiva);
- 3) Cuffia posizionata in modalità ANC ON (cuffia passiva + attiva).

In **Figura 5** e in **Tabella 1** sono riportati, a titolo di esempio, i dati misurati dell'attenuazione fornita da una delle cuffie, per bande d'ottava tra 20 Hz e 20.000 Hz, mentre in **Figura 6** e in **Tabella 2** sono riportati i dati dell'attenuazione nel range in frequenza da 20 Hz a 800 Hz, corrispondente all'intervallo di funzionamento del controllore attivo della cuffia dichiarato dal costruttore.

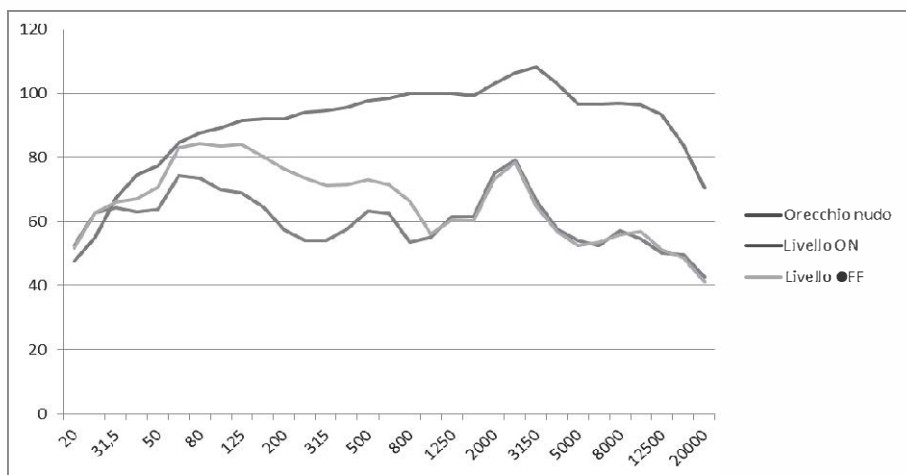


Figura 5: Confronto tra i dati misurati riferiti alla cuffia "B" nel range in frequenza 20 Hz ÷ 20KHz: orecchio manichino nudo (curva blu), cuffia su manichino in modalità ANC OFF (curva verde) e in modalità ANC ON (curva rossa)

Tabella 1: Confronto tra i livelli misurati nel range in frequenza 20 Hz ÷ 20KHz nelle tre condizioni di prova: a) orecchio manichino nudo, b) cuffia indossata in modalità ANC OFF, c) cuffia indossata in modalità ANC ON, d) = a) – b), e) = a) – c).

Posizionamento	a) Orecchio Nudo	b) Livello OFF	c) Livello ON	d) Orecchio nudo - cuffia OFF	e) Orecchio nudo - cuffia ON
L_{Zeq}	113,8	91,2	83,3	22,6	30,5
L_{Aeq}	114,3	82,6	82,4	31,7	31,9

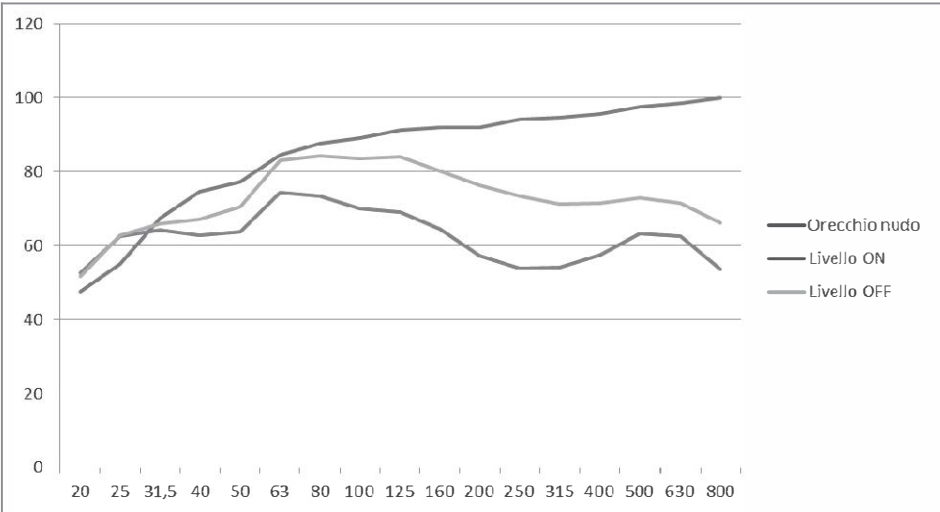


Figura 6: Dettaglio della Figura 6 nel range in frequenza 20 Hz ÷ 800Hz

Tabella 2: Dettaglio della Tabella 1 nel range in frequenza 20 Hz ÷ 800 Hz

Posizionamento	a) Orecchio Nudo	b) Livello OFF	c) Livello ON	d) Orecchio nudo - cuffia OFF	e) Orecchio nudo - cuffia ON
L_{Zeq}	105,9	90,9	79,3	15	26,6
L_{Aeq}	102,6	77,2	65,2	25,4	37,4

Il dato di attenuazione in frequenza dovuto al solo controllo attivo della cuffia si può dedurre dalle Figure 5 e 6 per differenza tra le curve rosse e verdi; in termini globali, dalla differenza tra i dati nelle colonne e) e d) delle Tabelle 1 e 2. In particolare,

nell'intervallo 20 Hz ÷ 800 Hz effettivamente il controllo ANC funziona, con una attenuazione complessiva della sola cancellazione attiva pari a circa 12 dB(A): valore inferiore a quello dichiarato dal costruttore, ma comunque significativo. Tale dato si è rivelato abbastanza stabile in ampiezza e nel tempo durante le prove in laboratorio; anche le prime prove effettuate con segnali variabili nel tempo hanno evidenziato un funzionamento analogo. Da sottolineare la compattezza della cuffia, che appare come una normale cuffia passiva, con una alimentazione del controllore ANC a batteria (1 pila tipo AA da 1,5 V incorporata nella conchiglia) con una autonomia dichiarata di 60 ore.

4 - CONCLUSIONI

La cuffia Noise Buster modello PA4000 della Pro Tech Technologies americana, basata sul principio del controllo attivo del rumore (ANC, *Active Noise Control*), testata presso il Laboratorio Agenti Fisici dell'INAIL, è una normale cuffia passiva circumaurale, la cui efficienza è crescente con la frequenza, tipica di questa tipologia di dispositivi. Quando si attiva la modalità ANC, all'attenuazione passiva si somma quella attiva tra 20 Hz e 800 Hz, con il risultato che l'efficienza di attenuazione diventa quasi omogenea su tutto l'intervallo da 125 Hz a 8.000 Hz. In questo modo, questa cuffia può garantire una buona protezione acustica a basse frequenze, regione nella quale nessun DPI-u garantisce attenuazioni igienisticamente rilevanti a causa dei limiti intrinseci della tecnologia di attenuazione passiva del rumore.

È auspicabile quindi che questo dispositivo, che a conoscenza degli autori è l'unica vera cuffia ANC di protezione personale per i lavoratori disponibile in commercio, diventi disponibile anche sul mercato italiano ed europeo, a seguito della sua omologazione e certificazione CE secondo gli attuali standard tecnici e normativi di prodotto [3, 4].

BIBLIOGRAFIA

- [1] P. Nataletti “Attuali prospettive del controllo attivo del rumore e delle vibrazioni”, Atti del Convegno **dba_incontri 2014**, Modena 17 settembre 2014
- [2] Maggiori informazioni si possono reperire sul sito www.noisebuster.net
- [3] Norma EN 352-1:2004 “Protettori dell'udito – Requisiti generali – Parte 1: Cuffie” e EN 352-5:2006 Protettori dell'udito - Requisiti di sicurezza e prove - Parte 5: Cuffie con controllo attivo della riduzione del rumore
- [4] Decreto Legislativo n. 475 del 4 dicembre 1992 “Attuazione della direttiva 89/686/CEE del Consiglio del 21 dicembre 1989, in materia di ravvicinamento delle legislazioni degli Stati membri relative ai dispositivi di protezione individuale”

INTERAZIONE FRA RUMORE, SEGNALI DI EMERGENZA ED AVVERTIMENTO, ESITI DI UNA CAMPAGNA DI VERIFICA E CONTROLLO

Michele Taddei, Luigi Felisa

EcoGeo S.r.l - Parma

1 - PREMESSA

Un segnale acustico di sicurezza o emergenza deve essere sempre in grado di avvisare di un pericolo imminente e deve indicare l'inizio e la durata di una situazione pericolosa. Secondo questo principio generale, i segnali acustici di pericolo devono essere chiaramente udibili in ogni condizione, essere facilmente distinguibili da altri suoni e rumori potenzialmente presenti, e devono essere codificati al fine di indicare quali comportamenti adottare. Tramite una campagna di misure, effettuata su vari impianti per la segnalazione dell'evacuazione, sono state analizzate le principali criticità dei segnali sonori, al fine di valutare possibili miglioramenti ed approcci utili sia per la progettazione sia per la verifica in opera dei segnali acustici di emergenza.

2 - RIFERIMENTI NORMATIVI

In materia dei segnali acustici di pericolo occorre fare una prima distinzione in relazione all'uso: A) segnali per scopi di sicurezza B) segnali per scopi di emergenza. Nel primo caso ricadono tutti quei sistemi sonori ed acustici di avviso che hanno funzione di segnalare un pericolo legato al funzionamento di una macchina, di un impianto o più in generale il pericolo in un'area di lavoro.

Tali avvisi possono essere degli allertamenti preventivi, dei segnali di pericolo grave, segnali di malfunzionamento o segnali di avvio o interruzione di lavorazioni. Nella seconda categoria ricadono quei segnali acustici che indicano una condizione di emergenza, quindi una condizione operativa eccezionale e tale da comportare pericoli generalmente gravi e imminenti; i segnali acustici di emergenza sono destinati ad essere uditi dal maggior numero di persone presenti, quali ad esempio impianti di allarme interni, impianti esterni, ed impianti per avvisare l'intera popolazione (come nel caso di aziende a rischio rilevante o impianti quali dighe, ecc...).

In relazione al tipo di segnale, per scopi di sicurezza o per scopi di emergenza, si hanno differenti norme tecniche che forniscono indicazioni specifiche sui segnali di pericolo e sugli impianti che li generano, fra queste si trovano sia norme di sistema, sia norme di prodotto. Nel panorama normativo si inseriscono normative quali il D.Lgs.81/2008 e s.m.i., che fornisce le indicazioni generali da adottare per la segnaletica di sicurezza, e normative specifiche per l'antincendio quali il DM 16 marzo 1998, che definisce i criteri per la gestione delle emergenze.

Per meglio inquadrare il tema della corretta verifica e controllo dei sistemi di segnalazione sonora, in funzione del tipo di segnale sonoro e della sua destinazione di utilizzo, di seguito si citano le principali norme di settore a titolo di riferimento generale.

Il D.Lgs.81/2008 e s.m.i. richiama i segnali acustici in varie parti del testo normativo, in particolare troviamo nell'allegato XXX, *"Prescrizioni per i segnali acustici"* in cui si specifica che un segnale acustico deve: *"a) avere un livello sonoro nettamente superiore al rumore di fondo, in modo da essere udibile, senza tuttavia essere eccessivo o doloroso; b) essere facilmente riconoscibile in rapporto particolarmente alla durata degli impulsi ed alla separazione fra impulsi e serie di impulsi, e distinguersi nettamente, da una parte, da un altro segnale acustico e, dall'altra, dai rumori di fondo. Nei casi in cui un dispositivo può emettere un segnale acustico con frequenza costante e variabile, la frequenza variabile andrà impiegata per segnalare, in rapporto alla frequenza costante, un livello più elevato di pericolo o una maggiore urgenza dell'intervento o dell'azione sollecitata o prescritta. Codice da usarsi. Il suono di un segnale di sgombero deve essere continuo."*

La norma non specifica quindi livelli o caratteristiche del segnale sonoro ma ne definisce i criteri generali, si può quindi presumere che il Legislatore preveda l'adozione delle norme tecniche specifiche purché non in contrasto con tali principi generali.

Proseguendo nell'analisi del testo, secondo quanto prescritto dall'art.190 comma 1, lettera e) del D.Lgs.81/2008: *"il datore di lavoro valuta l'esposizione al rumore durante il lavoro prendendo in considerazione: tutti gli effetti indiretti sulla salute e sulla sicurezza dei lavoratori risultanti da interazioni fra rumore e segnali di avvertimento o altri suoni che vanno osservati al fine di ridurre il rischio di infortuni"*

Anche in questo caso non si danno indicazioni specifiche sulle modalità di verifica. È quindi utile riportare quanto indicato dal documento n.1-2009 dal C.T.I.P.L.L. Coordinamento Tecnico per la sicurezza nei luoghi di lavoro e delle Regioni e delle Province autonome, in revisione 03 del 13/02/2014, al punto 2.05: *"per evitare il rischio di infortuni dovuti a tale effetto di mascheramento (inteso come mascheramenti del segnale di avvertimento a causa del rumore presente in azienda), i segnali di avvertimento devono sempre essere, chiaramente udibili, discriminabili e inequivocabili, indipendentemente dal clima acustico presente nei luoghi di lavoro. Le regole di base per i segnali acustici sono indicati nel Titolo V del D.Lgs.81/2008, mentre le norme di riferimento sono la UNI EN 981:2009 e la UNI EN ISO 7731:2009"*

Relativamente ai segnali acustici per avvisare di situazioni di pericolo durante l'uso di macchine e impianti, la norma di riferimento è la direttiva europea macchine 2006/42/CE, recepita con il D.Lgs. n.17 del 27/01/2010, che stabilisce l'installazione obbligatoria a bordo macchina di idonei dispositivi di segnalazione acustica e luminosa, essenziali alla sicurezza degli operatori in ambito industriale. Gran parte degli argomenti trattati nella direttiva sono relativi ad aspetti progettuali per la messa in sicurezza globale del "sistema macchina". In dettaglio nell'Allegato I al punto 1.7.1.2. "Dispositivi di allarme" viene indicato quanto segue: *"Quando la sicurezza e la salute delle persone possono essere messe in pericolo da un'avaria di una macchina che funziona senza sorveglianza, la macchina deve essere attrezzata in modo da emettere un segnale di avvertenza sonoro o luminoso adeguato. Se la macchina è munita di dispositivi di avvertenza, essi devono poter essere compresi senza ambiguità e facilmente percepiti. Devono essere prese misure opportune per consentire all'operatore di verificare la costante efficienza di questi dispositivi di avvertenza. Devono essere applicate le disposizioni delle specifiche direttive comunitarie concernenti i colori ed i segnali di sicurezza."*

Il D.M 10 marzo 1998 tratta i criteri generali di sicurezza antincendio e gestione delle emergenza nei luoghi di lavoro. Definisce inoltre le misure per la rilevazione e l'allarme in caso di incendio; in particolare nell'allegato IV al punto 4.4 tratta le procedure di allarme differenziando possibili scenari di evacuazione ad una o più fasi che comportano sistemi di segnalazione più o meno complessi. Fra questi contempla anche, per situazioni ad elevato affollamento, allarmi costituiti da messaggio preregistrato. Il decreto non fa menzione riguardo le caratteristiche acustiche necessarie per i segnali di emergenza

Relativamente agli impianti (per la rilevazione e l'allarme in caso di incendio ed emergenza) la norma di riferimento è il D.M. n. 37 del 22/01/2008: *"regolamento in materia di attività di Installazione degli Impianti all'interno degli edifici"*. La norma relativamente alla progettazione di impianti definisce che per l'installazione, la trasformazione o l'ampliamento degli impianti di protezione antincendio e impianti elettronici in genere, sia redatto un Progetto, a seconda dei casi, da un Professionista iscritto all'Albo Professionale o dal Responsabile Tecnico dell'Impresa Installatrice. La norma inoltre prevede che i progetti degli Impianti siano elaborati secondo la Regola dell'Arte in conformità alla vigente normativa e alle indicazioni delle Guide e alle Norme UNI, CEI o di altri Enti di Normalizzazione. I Progetti devono contenere almeno:

- gli schemi dell'impianto;
- i disegni planimetrici;
- una relazione tecnica riguardo la consistenza e la tipologia dell'installazione, la trasformazione o l'ampliamento dell'impianto stesso, con particolare attenzione nello specificare la tipologia e le caratteristiche dei materiali e componenti da utilizzare e le misure di prevenzione e di sicurezza da adottare.

Dall'analisi delle norme sopra citate non emergono indicazioni specifiche relativamente ai parametri acustici da adottare per la scelta e la progettazione dei sistemi di allarme, si possono quindi ragionevolmente adottare norme tecniche ove queste non siano in contrasto con la normativa cogente. Di seguito, sono riassunte le principali norme tecniche di riferimento.

UNI EN 54-3:2014: Sistemi di rivelazione e di segnalazione d'incendio - Parte 3: Dispositivi sonori di allarme incendio - Versione ufficiale della norma europea EN 54-3 (edizione luglio 2014). La norma specifica i requisiti, i metodi di prova e i criteri di prestazione per i dispositivi sonori di allarme incendio, inclusi quelli a voce, in un'installazione fissa destinati ad emettere un segnale sonoro di allarme incendio. La norma fornisce la valutazione e la verifica per il mantenimento di prestazione (AVCP) dei dispositivi sonori di allarme. Essa si applica solo ai dispositivi alimentati da una sorgente esterna.

UNI 9795:2013: Sistemi fissi automatici di rivelazione e di segnalazione allarme d'incendio - Progettazione, installazione ed esercizio - La norma prescrive i criteri per la progettazione, l'installazione e l'esercizio dei sistemi fissi automatici di rivelazione e di segnalazione allarme d'incendio. Essa si applica ai sistemi fissi automatici di rivelazione, di segnalazione manuale e di allarme d'incendio, collegati o meno ad impianti di estinzione o ad altro sistema di protezione (sia di tipo attivo che di tipo passivo), destinati a essere installati in edifici, indipendentemente dalla destinazione d'uso.

UNI 11224:2011: Controllo iniziale e manutenzione dei sistemi di rivelazione incendi - La norma descrive le procedure per il controllo iniziale, la sorveglianza e il controllo periodico, la manutenzione e la verifica generale dei sistemi di rivelazione automatica di incendio.

UNI ISO 7240-19:2010: Sistemi fissi di rivelazione e di segnalazione allarme d'incendio - Parte 19: Progettazione, installazione, messa in servizio, manutenzione ed esercizio dei sistemi di allarme vocale per scopi d'emergenza - La norma specifica i requisiti per la progettazione, installazione, messa in servizio, manutenzione ed esercizio dei sistemi di allarme vocale per scopi d'emergenza, destinati principalmente a diffondere informazioni per la protezione delle vite umane all'interno di una o più specifiche aree, all'interno o all'esterno, durante un'emergenza. La norma non si applica ai sistemi sonori che utilizzano campane o dispositivi sonori.

UNI EN ISO 7731:2009: Ergonomia - Segnali di pericolo per luoghi pubblici e aree di lavoro - Segnali acustici di pericolo - La norma è la versione ufficiale in lingua inglese della norma europea EN ISO 7731 (edizione settembre 2008). La norma specifica i principi fisici di progettazione, i requisiti ergonomici e i corrispondenti metodi di prova per segnali di pericolo per luoghi pubblici e aree di lavoro nell'area di ricezione del segnale e fornisce linee guida per la progettazione dei segnali. Essa può anche essere applicata ad altre situazioni appropriate.

UNI EN 981:2009: Sicurezza del macchinario - Sistemi di segnali di pericolo e di informazione uditivi e visivi - La norma è la versione ufficiale in lingua inglese della norma europea EN 981:1996+A1 (edizione settembre 2008) e tiene conto delle correzioni introdotte il 15 ottobre 2008. La norma è applicabile a tutti i segnali di pericolo e di informazione che devono essere chiaramente percepiti e differenziati mediante altri requisiti o mediante la situazione di lavoro, e a tutti i livelli di emergenza, dall'estrema urgenza a una situazione di cessato pericolo. Nei casi in cui segnali visivi debbano integrare segnali sonori, il carattere del segnale viene specificato per entrambi.

IEC 61310-1 ed.2.0: Sicurezza del macchinario - Indicazione, marcatura e manovra - Parte 1: Requisiti per segnali visivi, acustici e tattili - Specifica i requisiti per segnali visivi, acustici e tattili, i metodi per indicare le informazioni relative alla sicurezza, a livello di interfaccia uomo-macchina e per le persone esposte. Specifica un sistema di colori, segnaletica di sicurezza, segnaletica e altri avvisi, destinati ad essere utilizzati per l'indicazione di situazioni pericolose e di rischi per la salute e per condizioni di emergenza. Specifica inoltre modalità di codifica dei segnali visivi, acustici e tattili, per indicatori e attuatori, per facilitare l'uso sicuro e il controllo della macchina.

3 - TERMINI, DEFINIZIONI E SIMBOLI

Nel presente capitolo si riassumono le definizioni dei principali termini utilizzati:

- Rumore ambientale: tutti i suoni della zona di ricezione del segnale non prodotti dal trasmettitore del segnale.
- Segnale acustico di pericolo: in funzione del grado di urgenza è distinguibile in diversi livelli; nella presente trattazione vengono distinti segnali di emergenza ed evacuazione, e segnali di avvertimento.
- Segnale acustico di emergenza ed evacuazione: segnale indicante l'inizio o l'effettivo verificarsi di una situazione emergenziale che comporta la possibilità di lesioni e allerta le persone perché abbandonino immediatamente la zona pericolosa secondo le modalità di evacuazione definite.
- Segnale acustico di avvertimento: segnale che indica la possibilità o l'effettivo verificarsi di una situazione di pericolo che richiede misure adeguate per l'eliminazione o il controllo del pericolo stesso.
- Soglia effettiva di mascheramento: livello del segnale acustico di pericolo appena udibile al di sopra del rumore ambientale, tenendo conto dei parametri acustici sia del rumore ambientale nella zona di ricezione del segnale, sia di una ridotta capacità uditiva (dovuta a otoprotettori, a ipoacusia o ad altri effetti di mascheramento).

Di seguito i principali simboli utilizzati, tutti espressi in decibel (dB):

- $L_{N,A}$: livello sonoro ponderato A del rumore ambientale
- $L_{Ni, \text{ oct}}$: livello in bande d'ottava del rumore ambientale
- $L_{Ni, 1/3 \text{ oct}}$: livello in bande di terzi d'ottava del rumore ambientale
- $L_{S,A}$: livello sonoro ponderato A del segnale di pericolo
- $L_{Si, \text{ oct}}$: livello in bande d'ottava del rumore del segnale di pericolo
- $L_{Si, 1/3 \text{ oct}}$: livello in bande di terzi d'ottava del rumore del segnale di pericolo
- $L_{Ti, \text{ oct}}$: livello in bande d'ottava della soglia effettiva di mascheramento
- $L_{Ti, 1/3 \text{ oct}}$: livello in bande di terzi d'ottava della soglia effettiva di mascheramento

4 - SCOPO DEL LAVORO

Traendo spunto da recenti avvenimenti che hanno sottoposto all'attenzione dell'opinione pubblica, la situazione critica in cui versano molti istituti scolastici in termini di stato di conservazione di parti strutturali e non strutturali, vista l'importanza che riveste la capacità di evacuare un edificio ad elevato affollamento quale un istituto scolastico, è stata progettata una campagna di misura della udibilità dei segnali acustici di emergenza. Sono stati presi a campione n.12 istituti scolastici distribuiti nel territorio della Provincia di Parma, a partire da scuole dell'infanzia fino a scuole secondarie di primo grado. L'obiettivo delle indagini è stato quello di verificare con una metodologia semplificata, l'efficacia dei segnali acustici di evacuazione al fine di poter valutare in modo rapido la conformità o meno dell'impianto adottato e la reale udibilità del sistema.

5 - METODOLOGIA DI LAVORO

La progettazione del lavoro è stata eseguita attraverso un'analisi preliminare delle normative (richiamate nei capitoli precedenti) da cui sono emerse tre principali norme tecniche applicabili alla valutazione dell'udibilità dei segnali acustici di evacuazione di emergenza.

La norma UNI 7731:2009 tratta i principi fisici di progettazione ed i metodi di prova per i segnali sonori di pericolo sia in luoghi pubblici, sia in aree di lavoro. La norma prevede come caratteristica principale dei segnali di pericolo, che questi debbano essere chiaramente udibili e distinguibili, che abbiano un livello sonoro minimo di 65 dB(A) in ogni zona di ricezione ed un massimo di 118 dB(A). Inoltre la stessa indica che sia soddisfatto almeno uno dei seguenti criteri differenziali:

- metodo a), misura del livello di pressione sonora ponderato A: differenza fra i livelli di rumore di fondo e rumore ambientale almeno di 15 dB(A) - $L_{s,A} - L_{N,A} > 15 \text{ dB}$
- metodo b), il livello di pressione sonora in una o più bande d'ottava deve essere maggiore della soglia effettiva di mascheramento di almeno 10 dB nella banda di ottava considerata - $L_{Si,oct} - L_{Ti,oct} > 10 \text{ dB}$
- metodo c), il livello di pressione sonora in una o più bande in terzi d'ottava deve essere maggiore della soglia effettiva di mascheramento di almeno 13 dB nella banda di in 1/3 d'ottava considerata - $L_{Si,1/3oct} - L_{Ti,1/3oct} > 13 \text{ dB}$

Al fine di garantire che i segnali acustici di pericolo abbiano caratteristiche ben distinguibili da altri eventualmente presenti, la norma raccomanda una frequenza del segnale compresa fra 500 Hz e 2500 Hz, e preferibilmente con componenti dominanti a 500 Hz ed a 1500 Hz. Consiglia un segnale con emissione pulsante, e non continua, con frequenza di ripetizione compresa fra 0,5 Hz e 4 Hz (più è elevato il tempo il tempo di riverbero dell'ambiente e più dovrà essere bassa la frequenza di ripetizione). Prevede frequenza di ripetizione e durata della pulsazione differenziati rispetto ad altri segnali eventualmente presenti nell'ambiente ed indica l'introduzione di segnali visivi quando il rumore ambientale dell'area supera il livello di pressione sonora ponderato A di 100 dB(A).

Le caratteristiche del segnale possono essere differenti in funzione del tipo di avviso che si vuole dare, al fine di evitare che segnali con diversi significati possano confondersi. A questo proposito la norma UNI EN 981 prevede per i segnali di attenzione urgente le seguenti modalità:

- sweeping, continuo o alternato ON/OFF;
- bursts, alternato ON/OFF;
- alternating pitch, (a step di 2 o 3 frequenze) continuo o alternato ON/OFF.

Mentre per i segnali di emergenza:

- sweeping continuo;
- spettro costante alternato ON/OFF, periodo da 4 a 20 secondi.

Dove: per sweeping si intende un segnale che varia in frequenza con cicli da 5Hz/s a 5Hz/ms; per burst, un segnale pulsante con frequenza da 4 a 8 Hz e durata della singola pulsazione da 60ms a 100ms, e per alternating, un segnale con sequenza graduale di due o tre frequenze, ognuna della durata da 0,15s a 1,5 s.

La norma UNI 9795:2013, definisce i criteri per i sistemi fissi automatici di rivelazione e di segnalazione allarme d'incendio. Relativamente all'acustica dei segnali di emergenza prevede i seguenti requisiti:

- il livello acustico percepibile deve essere maggiore di 5 dB(A) al di sopra del rumore ambientale – $L_{s,A-LN,A} > 5 \text{ dB(A)}$;
- la percezione acustica da parte degli occupanti dei locali deve essere compresa fra 65 dB(A) e 120 dB(A);
- negli ambienti dove è previsto che gli occupanti dormano, la percezione alla testata del letto deve essere di 75 dB(A) fatta eccezione per i casi in cui gli occupanti, per motivi sanitari ad esempio, non possano essere soggetti a stress provocati da alti livelli sonori;
- le segnalazioni acustiche devono essere affiancate o sostituite da segnalazioni ottiche nel caso di ambienti il cui rumore supera i 95 dB(A), o nel caso in cui gli occupanti utilizzano protezioni acustiche o possiedono disabilità dell'udito, oppure utilizzino audioguide (es.: musei), ed in generale ove le segnalazioni acustiche siano inefficaci o controindicate;
- la norma consente integrazioni di messaggi vocali e segnali sonori, purché non interferiscano fra loro.

Viste le differenti metodologie proposte dalle norme si è optato per una verifica combinata sia secondo la UNI 9795:2013 (specifica per la segnalazione dell'allarme incendio), sia secondo la UNI 7731:2009 (di più ampia applicabilità, dai segnali di emergenza, ai segnali di evacuazione fino ai segnali di avvertimento).

Come riportato in precedenza in entrambe le norme vi è un valore minimo di 65 dB(A) ed un valore massimo di 120 dB(A) nel primo caso e 118 dB(A) nel secondo. Per semplificare è stato utilizzato il valore di 118 dB(A) quale riferimento per valutare la conformità dell' $L_{s,A,max}$.

Entrambe le norme prevedono il rispetto di un valore differenziale fra impianto attivo e rumore ambientale con impianto non attivo; per tale parametro le differenze sono più marcate. Mentre infatti la norma UNI 9795 pone come valore minimo 5 dB(A), la UNI 7731 pone come minimo 15 dB(A), specificando però l'alternativa di

un raffronto in base alla frequenza. Per effettuare i confronti sono stati quindi valutati i seguenti parametri:

- livello minimo;
- livello massimo;
- differenza fra rumore del segnale e rumore ambientale (secondo i valori di riferimento di entrambe le norme);
- differenza fra rumore del segnale e la soglia effettiva di mascheramento in terzi d'ottava;
- range di frequenza del segnale di pericolo al fine dell'udibilità.

Il lavoro è stato realizzato attraverso rilievi acustici eseguiti con strumentazione fonometrica in classe 1. I parametri di time history sono stati ottenuti con tempo di acquisizione pari ad 1/8 di secondo, completi di dati spettrali in 1/3 d'ottava. Le misure sono state eseguite seguendo il seguente schema:

- 1) rilievi alla sorgente con postazione microfonica a distanza di 1 – 2 m dalla sirena/diffusore e comunque alla distanza minima fra emettitore e possibile presenza di persone,
- 2) rilievi del segnale in aula a distanza nota dalla sorgente;
- 3) rilievi della rumorosità ambientale in aula.

Lo schema di rilievo, estremamente semplificato, ha volutamente trascurato l'acquisizione di dati relativi a problematiche geometriche di ubicazione dell'impianto e delle aule, poiché l'obiettivo era valutare solo l'efficacia del sistema. Nel caso in cui l'obiettivo fosse stato anche la progettazione di un impianto, le caratteristiche geometriche avrebbero assunto ovviamente un ruolo centrale, e avrebbero necessitato di uno specifico approfondimento. La buona tecnica infatti prevede che per progettare un impianto sia necessario dimensionarlo attraverso una simulazione di propagazione acustica che tenga conto anche dell'involucro edilizio, delle caratteristiche dei materiali, del grado di isolamento e di assorbimento acustico e del tempo di riverbero.

Oltre al dato acustico si è scelto di effettuare anche registrazioni audio, utili per il confronto con la misura, al fine di poter meglio associare, in fase di elaborazione dei dati, i livelli di rumore al reale fenomeno acustico; per tale operazione si è ritenuto sufficiente un'acquisizione audio in bassa qualità. In assenza di registrazione sono comunque ottenibili analoghe informazioni anche tramite note con riferimenti temporali da parte dell'operatore. Per l'acquisizione dei dati l'operatore ha utilizzato la scheda di rilievo esemplificata in **Tabella 1**.

6 - RISULTATI E DISCUSSIONE

Le misure sono state eseguite in occasione di prove di evacuazione organizzate a sorpresa nei vari plessi scolastici indagati, uniformemente distribuiti fra scuole per l'infanzia, scuole primarie e secondarie. Gli impianti rilevati vanno dalla semplice campanella utilizzata anche per dare il segnale di inizio e fine lezione, a campane antincendio omologate, sirene antincendio, fino a più recenti sistemi con messaggio vocale preregistrato riscontrati in due edifici scolastici di recente costruzione.

Tabella 1: scheda di rilievo utilizzata dall'operatore per annotare le caratteristiche della zona di misura

N° Misura:	Tipo di misura: <input type="checkbox"/> Segnale; <input type="checkbox"/> Ricettore; <input type="checkbox"/> Ambientale	
Tipo di segnale sonoro:	<input type="checkbox"/> Sirena;	Durata misura (sec.):
	<input type="checkbox"/> Campana;	Distanza dal segnale sonoro (m):
	<input type="checkbox"/> Altoparlante;	Altezza da terra (m):
	<input type="checkbox"/> Megafono;	Valore a fine misura (dba):
<input type="checkbox"/> Altro		
Marca e modello:		
Riferimento zona di misura:		
Descrizione zona e contesto di misura:		
Foto n°:	Registrazione audio/video n°:	
N° Evento	Tempo da inizio misura	Descrizione evento
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		

Per la definizione del rumore ambientale (L_N) sono state effettuate misure in varie condizioni, in relazione all'attività didattica, in differenti tipologie di Istituti Scolastici, ottenendo estrema variabilità di risultati. Complice la peculiarità della vita scolastica, infatti, si passava da momenti propri alle attività di studio, con valori anche inferiori ai 40 dB(A), a momenti con attività didattiche e valori variabili fra i 55 ed i 65 dB(A), fino a situazioni di ricreazione, o mensa con valori anche superiori agli 80 dB(A).

Per il presente studio si è scelto di raffrontare i dati misurati in due condizioni didattiche rappresentative di situazioni di media ed alta attività, escludendo quindi le condizioni estreme di bassa o altissima rumorosità. I valori di rumore ambientale utilizzati per il confronto con i valori dei segnali, sono stati $L_{N \min} = 65,7$ dB(A) e $L_{N \max} = 78,8$ dB(A), si è scelto infatti di assegnare stessi livelli di rumore ambientale nei vari plessi scolastici indagati, al fine di poter disporre di dati confrontabili (Figura 1). Tale semplificazione ovviamente non tiene conto di situazioni particolari come palestre, sale musica, laboratori, mense o altri luoghi in cui la rumorosità può essere decisamente superiore. In base alle misure effettuate sono stati analizzati i risultati riassunti in Tabella 2.

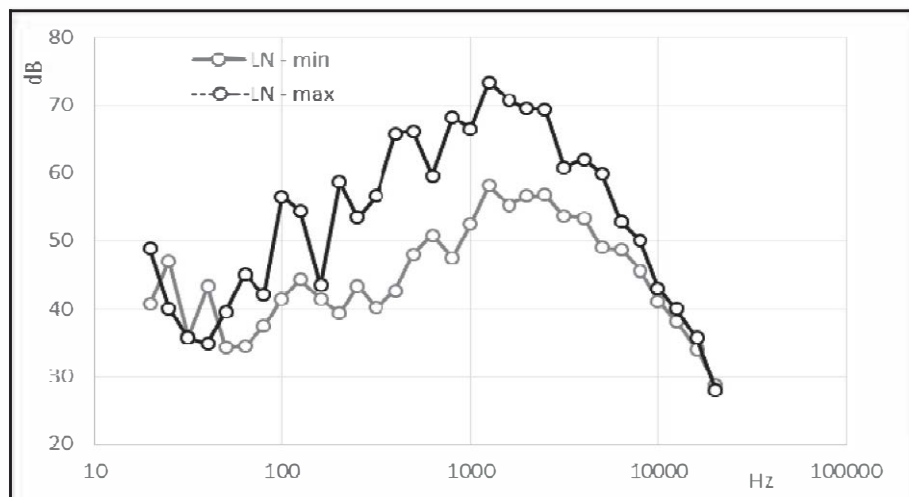


Figura 1: grafico relativo ai valori in terzi d'ottava dei livelli di rumore ambientale, minimo ($L_{N \min}$) e massimo ($L_{N \max}$), utilizzati per i confronti con i segnali acustici di emergenza

Dai risultati si può notare come il parametro del livello minimo nell'area ricevente ($L_{S \min}$) sia spesso disatteso, mentre sia sempre rispettato il valore massimo ($L_{S \max}$). I valori differenziali fra segnale e rumore ambientale ($L_S - L_N$), in soli tre plessi risultano conformi alla UNI 9795:2013 e limitatamente al raffronto con il rumore ambientale più basso ($L_{N \min} = 65,7$ dB(A)). Mentre in nessun caso si ha il rispetto del valore differenziale se il rumore ambientale superiore ($L_{N \max} = 78,8$ dB(A)) è utilizzato come termine di paragone.

Tabella 2: raffronto fra valori misurati e valori di riferimento, i valori evidenziati in grigio risultano conformi al parametro utilizzato quale riferimento

Parametri	L_S min	L_S max	$L_S - L_{Nmin}$	$L_S - L_{Nmax}$	$L_S - L_I$ 1/3oct	Frequenza 1/3 ottave
Unità di misura	dB(A)	dB(A)	dB(A)		dB(A)	kHz
Valori di riferimento	>65	<118	>5 - >15	>5 - >15	>13	0,5-2,5
Campanella Scuola1	74,2	95,6	8,5	-4,6	17,6	5-8
Sirena Scuola2	49,8	81,9	-15,9	-29	-13	3,15
Campanella Scuola3	60,4	87,1	-5,3	-18,4	-12	6,3
Sirena Scuola4	69,1	89,7	3,4	-9,7	6,6	4
Campanella+sirena Scuola5	52,0	85,3	-13,7	-26,8	-11	10
Campana Scuola6	63,2	101,5	-2,5	-15,6	-6,2	0,8
Messaggio Vocale Scuola7	79,4	86,6	13,7	0,6	25	0,2-6,3
Sirena Scuola8	68,1	105,0	2,4	-10,7	6	3,15
Campana Scuola9	61,7	107,0	-4	-17,1	-0,4	3,15
Sirena Scuola10	62,3	113,9	-3,4	-16,5	-10	2-3,15
Messaggio vocale Scuola11	79,5	90,7	13,8	0,7	20	0,16-0,315
Campanella Scuola12	47,8	86,1	-17,9	-31	-12	10

In nessuno dei casi analizzati si ha il rispetto del valore indicato dalla UNI 7731:2009 per il parametro differenziale $L_S - L_N$. Secondo quest'ultima norma è possibile in alternativa, valutare il differenziale in relazione ai livelli di pressione sonora in bande di terzi d'ottava, in tal caso tre scuole rientrano nel parametro di riferimento con il livello ambientale massimo L_{Nmax} (per il confronto in bande di terzi d'ottava è stato valutato solo L_{Nmax} trascurando il raffronto con il meno cautelativo L_{Nmin}). Infine relativamente al campo delle frequenze emesse solo tre sistemi di segnalazione mostrano valori all'interno del range indicato dalla UNI 7731:2009.

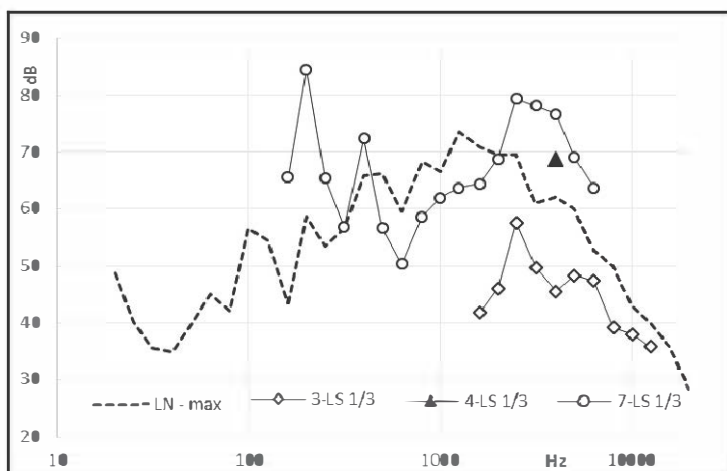


Figura 2: grafico di raffronto fra rumore ambientale massimo considerato (L_{Nmax}) e valore dei livelli di pressione sonora in terzi d'ottava dei segnali nell'ambiente ricevente delle scuole n. 3, 4, e 7 (rispettivamente campanella, sirena, messaggio vocale)

Lo studio effettuato, pur non essendo entrato nel dettaglio tecnico dei sistemi di segnalazione acustica rilevati in loco, ha consentito di verificare come i sistemi di segnalazione attraverso messaggio vocale siano risultati i più idonei.

Infatti entrambi gli impianti indagati sono realizzati con diffusori acustici distribuiti in ogni aula garantendo così un livello di pressione sonora del segnale ottimamente distribuito e modulabile in relazione alla destinazione stessa dell'aula.

Come riportato anche in **Figura 2**, l'andamento dei livelli in terzi d'ottava per la scuola n. 7, caratterizzata da impianto a messaggio vocale, mostra come pur non superando il rumore ambientale in tutte le frequenze, si abbiano due decisi superamenti intorno ai 160-200 Hz e fra 2,5 e 5,0 KHz, questo consente quindi una buona udibilità.

Segnali mono frequenza (come per l'impianto della scuola n.4) pur risultando udibili sono più facilmente mascherabili dal rumore ambientale, inoltre segnali caratterizzati da livelli di pressione sonora emessi a frequenza elevate (come per la scuola n. 3 che adotta una normale campanella, si veda anche la **Figura 3**) hanno una rapida perdita di efficacia con l'aumento della distanza dalla sorgente, risultando quindi poco udibili.

7 - CONCLUSIONI

L'approccio applicato per la determinazione dell'udibilità dei segnali acustici di emergenza ed evacuazione è stato impostato in modo da risultare applicabile a tutti i segnali di pericolo, e si integra con i principi di valutazione del rischio rumore previsti dal D.Lgs.81/2008 e s.m.i.

Più in generale il lavoro svolto si integra, con i criteri di valutazione dei rischi, secondo cui è necessario definire correttamente le misure di prevenzione, e quindi i segnali di avviso necessari per la sicurezza (allegato XXX e allegato XXIX) e per l'emergenza ed evacuazione. Inoltre, secondo quanto disposto sia dal D.Lgs.81/2008, che dal DM n.37/08 e dal D.Lgs n.17/10, occorre verificare periodicamente la corretta funzionalità dei segnali sonori, quindi le misure acustiche, eseguite secondo lo schema proposto, possono costituire anche documentazione comprovanti tali verifiche.

Dai dati analizzati emerge come, per avere un segnale di emergenza che garantisca un buon livello di udibilità, sia necessario che il segnale di pericolo comprenda componenti di frequenza fra i 500 Hz ed i 2500 Hz e preferibilmente componenti dominanti da 500 Hz a 1500 Hz.

In caso di messaggio vocale la gamma di frequenza copre quella tipica del parlato quindi viene naturalmente ben distinta dal contesto dall'orecchio umano.

Livelli di rumore troppo alti o che aumentino in modo repentino (es: 30 dB(A) in meno di 0,5 secondi) sono da evitare poiché possono generare paura e panico.

In generale, segnali di pericolo pulsanti devono essere preferiti ai segnali costanti nel tempo, (la frequenza di ripetizione proposta dalla normativa è nell'intervallo da 0,5 Hz a 4 Hz).

La durata dell'impulso e la frequenza di ripetizione degli impulsi del segnale di pericolo non devono confondersi con altri segnali presenti nella zona di ricezione del segnale.

In generale quindi sono consigliati segnali di pericolo con diverse frequenze fondamentali; ad esempio, segnali di pericolo con uno sweep di frequenza fondamentale nella gamma da 500 Hz a 1 000 Hz, con quattro armoniche, daranno adeguata udibilità del segnale. Inoltre, è da ricordare che frequenze troppo elevate sono da sconsigliare anche per la scarsa capacità di propagazione.

Dai dati rilevati emerge come impianti di emergenza ben progettati e dotati di segnale con messaggio vocale siano in generale preferibili in luoghi sensibili come edifici scolastici, sia perché forniscono chiare indicazioni (a patto che il messaggio preregistrato sia correttamente studiato e preparato), sia per la buona udibilità, ottenuta grazie alla presenza di emettitori in ogni aula e zona di passaggio, a garanzia di un'ottima diffusione del segnale.

Dalle prove eseguite, nonostante i dati mostrino il non rispetto di molti dei riferimenti proposti dalle norme UNI, è emerso che tutti gli occupanti hanno comunque percepito il segnale di evacuazione (ad eccezione di una sola classe nella scuola n.2). Tale condizione è da imputare al fatto che in tutte le 12 scuole analizzate, tutto il personale e tutti gli alunni, hanno mostrato un livello medio-alto di addestramento all'emergenza, reagendo sempre in modo ordinato ed efficace. Solo grazie alla continua formazione del personale ed al fatto che gli occupanti riconoscono immediatamente il segnale di emergenza, è stato possibile ottenere una rapida percezione del segnale acustico nonostante i valori strumentali rilevati.

Tale esito può essere imputato in parte, alla scelta cautelativa dei livelli di rumore ambientale adottati per i confronti (in particolare all' LN_{max}), che si sono registrati solo in una ridotta percentuale di tempo rispetto al complessivo delle ore di lezione. A questo deve però aggiungersi che la metodologia di valutazione delle norme UNI, riporta valori di riferimento non sempre facili da ottenere. Se da un lato tali parametri sono sicuramente necessari in caso di luoghi aperti al pubblico, in cui gli occupanti non hanno addestramento all'emergenza e non conoscono il segnale di evacuazione, dall'altro, in caso di luoghi di lavoro e scuole in cui la maggior parte dei lavoratori e dei presenti conosce l'organizzazione interna delle emergenze ed ha ricevuto sufficiente formazione ed addestramento, possono risultare eccessivi.

Inoltre, dalle sperimentazioni fatte è sicuramente consigliabile definire il grado di udibilità di un segnale non limitandosi al livello di pressione sonora ponderato A, ma approfondendo lo studio sui livelli in bande d'ottava o terzi d'ottava, parametro quest'ultimo che meglio rappresenta la reale udibilità di un segnale sonoro.

In conclusione attraverso un'attenta valutazione dei segnali acustici di pericolo, ed attraverso la conoscenza del livello di formazione ed addestramento del personale presente, il valutatore può ritenere accettabile il rischio associato all'emergenza ed all'evacuazione, anche in presenza di segnali acustici non pienamente rispondenti ai riferimenti delle norme UNI, fatto salvo che sia sempre garantito un livello minimo prestazionale degli impianti di segnalazione sonora.

I risultati delle valutazioni di efficacia dei segnali di pericolo ed emergenza dovranno però essere riportati nei documenti di valutazione del rischio.

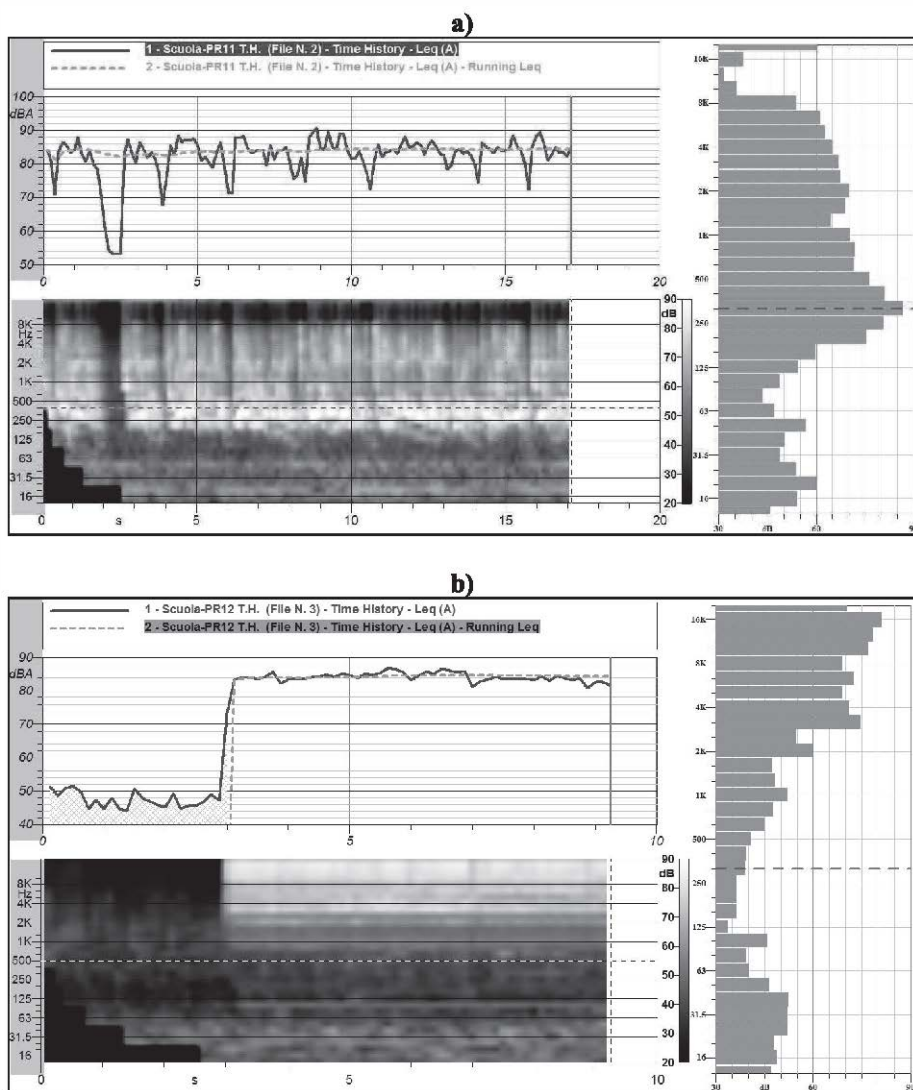


Figura 3: grafici ad evidenza delle differenze emissive fra due misurazioni effettuati nella scuola n.11 (a) con sistema di allarme vocale, e nella scuola n. 12 (b) con allarme a normale campanella. In entrambe le figure il primo grafico rappresenta l'andamento del livello di pressione sonora nel tempo, il grafico sottostante con scala a variazione di grigio, rappresenta l'andamento dello spettro nel tempo (in sec.), infine il grafico a colonne a lato rappresenta i livelli in terzi d'ottava mediati sull'intero periodo.

8 - BIBLIOGRAFIA

- [1] Atti del convegno “A scuola di prevenzione – Terremoti come affrontarli”, organizzato dall’Ordine dei Geologi dell’Emilia Romagna, in collaborazione con EcoGeo S.r.l.
- [2] Documento Tecnico Operativo (DTO) in preparazione, dal titolo “Interazione fra rumore e segnali di avvertimento, modalità di verifica e controllo, proposta metodologica di valutazione”, gentilmente concesso da AIAS Associazione Italiana Ambiente e Sicurezza, Comitato Tecnico Scientifico P4, Acustica e Vibrazioni.
- [3] Manuale di Acustica, a cura di Renato Spagnolo, edito da UTET
- [4] Emergenze antincendio: ecco come si progetta un sistema vocale, a cura di Andrea Lenzi, rivista Antincendio numero di settembre 2013, edita da EPC
- [5] Manuale di Buona Pratica “Metodologie e interventi tecnici per la riduzione del rumore negli ambienti di lavoro” , Scheda n.5, Secondo livello – versione approvata il 16.12.2004 – a cura di ISPESL
- [6] Linee Guida per l’applicazione del D.Lgs. 81/08 – N.09, Misurazione dell’esposizione e valutazione del rischio rumore, a cura di Claudio Arcari et al., edizione 2011, Azienda U.S.L. di Piacenza.

LO STUDIO DELLE EMISSIONI OTOACUSTICHE COME SENSIBILE INDICATORE DI ESPOSIZIONE ALLO STIRENE ED AL RUMORE

Renata Sisto⁽¹⁾, Filippo Sanjust⁽¹⁾, Luigi Cerini⁽¹⁾, Giovanna Tranfo⁽¹⁾, Maria Pia Gatto⁽¹⁾, Andrea Gordiani⁽¹⁾, Arturo Moletti⁽²⁾

¹ : INAIL, Centro Ricerche Monte Porzio Catone (RM).

² : Dipartimento di Fisica Università di Roma Tor Vergata.

1 - INTRODUZIONE

Da tempo ormai si pone particolare attenzione allo studio della sinergia tra differenti fattori di rischio in ambito lavorativo (Sliwinska-Kowalska, 2003; Morata, 2002; Steyger, 2009). In particolare, in questo lavoro si pone l'accento sull'interazione tra esposizioni simultanee ad agenti fisici e chimici ritenuti ototossici. Del resto l'attenzione a tali interazioni sinergiche è uno dei principali obiettivi della ricerca in ambito protezionistico, e questo perfettamente in linea con la Direttiva Europea 2003/10/CE, riguardante la protezione dei lavoratori dai rischi derivanti dall'esposizione a rumore, che raccomanda di individuare e sottolineare nel documento di valutazione del rischio l'esposizione simultanea al rumore ed altri fattori ototossici quali le vibrazioni ed i solventi organici EBTx (stirene, toluene, xilene).

In questo lavoro viene ampiamente sfruttato il potente mezzo di indagine che ci fornisce lo studio e l'analisi delle emissioni otoacustiche in quanto in grado di fornire un preciso imaging della funzionalità cocleare soprattutto in presenza di danni con diversa eziologia. Nel caso specifico, è stato indagato il danno derivante da differenti condizioni espositive, quantificando il rischio in presenza di esposizione simultanea a rumore ed altri agenti ototossici quali i solventi organici.

Negli ultimi decenni sono state raccolte ampie prove scientifiche che dimostrano come l'esposizione a solventi organici EBTx, da soli o in concerto con l'esposizione a rumore, abbia chiari effetti ototossici; purtroppo un reale criterio di tipo quantitativo atto a valutare correttamente il rischio derivante da tali interazioni sinergiche a tutt'oggi non esiste. Gli studi su animali (Campo *et al.*, 1999; Lataye *et al.*, 2000; Malikie *et al.*, 2003; Campo *et al.*, 2003) suggeriscono, ad esempio, che l'esposizione a stirene provochi danni permanenti alla coclea. La prova è stata trovata anche in analoghi esperimenti su effetti sinergici tra stirene e rumore. Parallelamente, studi sul campo condotti tra i lavoratori contemporaneamente esposti a solventi organici e rumore

confermano quello che è stato trovato nel modello sperimentale animale. I solventi organici, in particolare stirene e toluene, hanno un effetto negativo sulla funzione uditiva, e questo effetto sembra essere più grande rispetto a quello che si otterrebbe da una semplice legge additiva quando il rumore è simultaneamente presente sul luogo di lavoro (Sliwinska-Kowalska *et al.*, 2003; Morata *et al.*, 2002; Johnson *et al.*, 2006; Morata *et al.*, 2011).

Gli effetti sinergici del rumore con lo stirene sono stati ampiamente studiati da Johnson *et al.* (2006). Gli autori hanno utilizzato un completo set di test uditivi, compresi audiometria tonale (PTA), emissioni otoacustiche (prodotti di distorsione, DPOAEs), test di riconoscimento vocale, e di risposta audiometrica corticale. Il risultato principale di questo lavoro è che la soglia uditiva valutata mediante PTA è peggiorata ad un livello statisticamente significativo, in lavoratori esposti a rumore e stirene, rispetto a lavoratori esposti al solo rumore. L'effetto più significativo è stato rilevato dai test di riconoscimento vocale, il che suggerisce che l'esposizione a stirene potrebbe danneggiare anche il sistema nervoso centrale.

Altri autori hanno utilizzato test basati sulle OAE per identificare danni a livello delle cellule ciliate esterne (OHC). In particolare, i DPOAEs sono stati utilizzati come indicatori del danno cocleare indotto da solventi organici in esperimenti su animali (Pouyatos *et al.*, 2002; Lataye *et al.*, 2003). Altri studi sull'uomo hanno riportato una riduzione dell'ampiezza delle OAEs sia in quelle evocate da stimoli transitori (TEOAEs) sia nei DPOAEs, nei lavoratori esposti a solventi (Sulkowsky *et al.*, 2002).

Le otoemissioni acustiche (OAE) forniscono uno strumento veloce, non invasivo e sensibile per la diagnosi neurosensoriale del danno cocleare in soggetti esposti al rumore e/o altri agenti ototossici. Questi vantaggi incoraggiano il loro diffuso utilizzo nel campo della salute sul lavoro. A causa della complessità dei loro meccanismi di generazione (vedi, ad esempio, Shera e Guinan, 1999; Talmadge *et al.*, 1998), è fondamentale la conoscenza della meccanica cocleare, e avanzate tecniche di analisi basate su tale conoscenza costituiscono un utile complemento che potrebbe significativamente aumentare il loro potere diagnostico. In particolare tecniche di filtraggio e di analisi tempo-frequenza possono essere utilizzate per separare le componenti delle OAE aventi diverso ritardo di gradiente di fase, provenienti da differenti meccanismi di generazione (distorsione non lineare vs riflessione lineare) o da diverse regioni cocleari (Moleti *et al.*, 2012b; Sisto *et al.*, 2013a). In questo lavoro, riportiamo i risultati di uno studio in cui le OAE e la loro analisi mediante metodiche basate su tecniche tempo-frequenza vengono applicate al rilevamento del danno cocleare in soggetti esposti sia a rumore che a stirene (Sisto *et al.*, 2013b). In particolare, il danno derivante dall'esposizione a questi due agenti è stato indagato sui lavoratori di una fabbrica artigianale di manufatti in vetroresina vicino Perugia.

Poiché le OAEs sono epifenomeni correlati allo stato di salute dell'amplificatore cocleare, si è potuto stabilire che la riduzione dell'ampiezza di tali emissioni generalmente corrisponde ad un danno alle proprietà dinamiche della coclea, in particolare, al meccanismo di guadagno attivo associato all'elettromotilità delle OCH.

D'altro canto, la complessità dei meccanismi di generazione delle OAE potrebbe produrre effetti contrastanti che porterebbero limitazioni al loro effettivo potere clinico-diagnostico. Da qui la necessità di correggere detti test di avanzate tecniche di analisi (Moleti *et al.*, 2012b), tali da incrementare il loro rapporto segnale-rumore.

E' ben noto che la risposta dei DPOAE è costituita dalla somma vettoriale di due componenti. La prima sorgente, situata approssimativamente vicino al sito tonotopico di f_2 , dove la sovrapposizione tra i profili di eccitazione della membrana basilare (BM) relativi a f_2 e f_1 risulta massima, genera, tramite termini di distorsione cubici non lineari, onde di prodotti di distorsione (DP) che si propagano avanti e indietro. L'onda DP diretta può raggiungere il sito tonotopico risonante alla sua frequenza, dove viene amplificata e parzialmente riflessa indietro da irregolarità meccaniche distribuite casualmente (roughness). La componente DP riflessa ha una fase rapidamente rotante, mentre la componente non lineare ha una fase quasi costante, così che la loro somma vettoriale produce la ben nota struttura fine dello spettro dei DP, che, nelle misure cliniche standard effettuate a bassa risoluzione in frequenza, introduce una grande incertezza nei livelli spettrali misurati. Le due sorgenti possono però essere efficacemente separate sia con un filtraggio nel dominio del tempo sia in quello nel dominio tempo-frequenza (Moleti *et al.*, 2012b), e studiate separatamente, ma, sfortunatamente, ciò non può essere effettuato in questo studio poiché la bassa risoluzione in frequenza degli spettri ottenuti con un apparecchiatura commerciale che non consente una ricostruzione non ambigua della fase dei DPOAEs.

In una certa misura, considerazioni simili possono essere applicate ai test basati sulle TEOAE. Infatti recenti studi hanno dimostrato che la risposta delle TEOAE è la somma di componenti a latenza lunga e a latenza breve (LL e SL) (Goodman *et al.*, 2009, 2011; Moleti *et al.*, 2012a; Moleti *et al.*, 2012b; Sisto *et al.*, 2013a), ciascuna presumibilmente associata a differenti meccanismi/regioni cocleari di generazione. Le componenti LL si presume siano generate dal meccanismo di riflessione coerente che si attua vicino la regione di picco del profilo risonante della risposta della membrana basilare (BM) (Zweig and Shera, 1995). L'origine delle componenti SL non è ancora stata ben determinata. La loro rapida crescita con l'incrementarsi dello stimolo e la breve latenza dovrebbe essere compatibile sia con la distorsione da intermodulazione di componenti dello stimolo a frequenze più alte (Withnell *et al.*, 2008, Moleti *et al.*, 2012a), sia con una riflessione lineare da siti cocleari che sono essenzialmente spostati rispetto alla regione risonante (Goodman *et al.*, 2011). La somiglianza tra le risposte delle emissioni evocate da singolo stimolo (SFOAE) e quelle delle TEOAE (Kalluri and Shera, 2007; Sisto *et al.*, 2013a), suggerisce che tutte le principali componenti delle TEOAE e delle SFOAE provengano dallo stesso meccanismo, presumibilmente una riflessione lineare dalla roughness cocleare. Le altre componenti, la cui latenza sia il doppio o il triplo di quella delle corrispondenti componenti a LL, potrebbero essere interpretate come il risultato di una riflessione intracocleare tra la base e la regione risonante (Sisto *et al.*, 2013a).

Un avanzata metodologia di analisi basata su di un filtraggio tempo-frequenza dei segnali delle TEOAE (Moleti *et al.*, 2012b) è stata quindi applicata, il che potrebbe, in linea di principio, produrre qualche miglioramento nel potere diagnostico del sistema.

In teoria ci si aspetta che le componenti delle TEOAE provenienti dalla regione di picco della risposta risonante della BM siano più sensibili al danno causato al meccanismo di feedBack attivo delle OCH, poiché, allontanandosi dalla regione di picco, la risposta della BM diviene man mano più simile a quella del sistema lineare passivo. Per questa ragione, selezionando le componenti a LL si potrebbe migliorare la sensibilità diagnostica delle TEOAE. Un altro effetto positivo del filtraggio tempo-frequenza è un significativo miglioramento del SNR. Infatti, selezionando una regione piuttosto stretta nel dominio tempo-frequenza, si può includere buona parte del segnale e solo una piccola frazione del rumore, che è invece uniformemente distribuito lungo tutto il piano tempo-frequenza (Moleti *et al.*, 2012b).

Uno speciale sforzo è stato dedicato al monitoraggio dell'esposizione individuale al rumore e allo stirene nella popolazione esaminata. La valutazione dell'esposizione a solventi organici, in particolare allo stirene, è stata condotta durante lo stesso turno di lavoro sia mediante monitoraggio ambientale di esposizione personale sia mediante monitoraggio biologico. Il monitoraggio biologico è stato eseguito attraverso la misura della concentrazione di solventi nella saliva mediante gascromatografia liquida GC/MS con campionatore a spazio di testa statico e attraverso la misura della valutazione dei metaboliti urinari dello stirene acido mandelico (MA) e fenilgliossilico (PGA) mediante spettrometria di massa HPLC-MS/MS con diluizione isotopica.

Tutti i risultati sono stati attentamente analizzati al fine di valutare le possibili correlazioni tra le quantità di dose stimate, e per identificare i biomarkers più predittivi riguardo al danno cocleare.

2 - MATERIALI E METODI

2.1 CLASSIFICAZIONE DEI SOGGETTI

I soggetti esposti sono stati suddivisi in base alle loro specifiche mansioni; in particolare si distinguono due classi di operai, quelli impiegati nello stampaggio e quelli addetti alla rifinitura dei manufatti in vetroresina. Gli operai addetti alla rifinitura, in particolare, erano esposti ad elevati livelli di rumore, al di sopra del livello di azione di 85dBA stabilito dalle normative sulla sicurezza sul lavoro, e dovevano perciò indossare appositi dispositivi di protezione, mentre erano esposti ad un livello di stirene circa un ordine di grandezza inferiore rispetto alla soglia stabilita (TLV) dalla Conferenza Americana degli Igenisti Industriali Governativi (ACGIH). Il TLV è la concentrazione in aria di un dato agente chimico, alla quale si ritiene che quasi tutti i lavoratori possano essere ripetutamente esposti senza che si manifestino effetti dannosi sulla salute.

I lavoratori impiegati nello stampaggio erano viceversa esposti a livelli di rumore drasticamente inferiori, mentre il livello di stirene era dell'ordine del sopracitato TLV.

Gli addetti allo stampaggio erano 9 soggetti, età media 40.3 anni (massima 47 e minima 28 anni), tutte donne. Gli addetti alla rifinitura erano 6 soggetti, dei quali 5 maschi e una sola femmina, età media 42.1 anni (massima 52 e minima 32 anni). Il turno lavorativo era organizzato su 8 ore, e 2 dei soggetti addetti allo stampaggio erano in part-time. Per ogni soggetto è stato compilato un questionario anamnestico relativo all'esposizione professionale a rumore e a stirene, alle abitudini di vita e allo stato generale di salute. Nel caso del rumore è stata valutata anche l'esposizione extra professionale.

Dal punto di vista dell'esposizione sia a stirene che a rumore, i due gruppi, addetti alla rifinitura e addetti allo stampaggio, differiscono profondamente. I soggetti professionalmente esposti sono stati, pertanto, suddivisi in due gruppi:

1) gruppo "noise&styrene" (NS) che include gli addetti alla rifinitura che risultavano esposti a livelli di stirene più bassi rispetto a quelli a cui erano esposti gli addetti allo stampaggio, mentre risultavano esposti a livelli di rumore elevati (Lex,8h medio = 87.7 dBA, Lex,8h,max = 88 dBA e Lex,8h,min = 86.7 dBA);

2) gruppo "styrene" (S) a cui appartengono gli addetti allo stampaggio. In questo gruppo i soggetti risultavano esposti a livelli di rumore più bassi (Lex,8h medio = 83 dBA, Lex,8h,max 84.2 dBA e Lex,8h,min = 80.7 dBA) mentre erano esposti a livelli di stirene significativamente più elevati.

Risultavano normoacusici il 50% degli orecchi del gruppo NS e il 45% degli orecchi del gruppo S.

Una popolazione di 13 soggetti senza esposizione a rumore e a stirene è stata usata come gruppo di controllo (C). I soggetti appartenenti al gruppo C sono 11 donne e 2 uomini, con un'età media di 32 anni (minima 24 e massima 46 anni). Parte di loro era personale impiegato nella stessa azienda, altri erano studenti e ricercatori.

Tutti i soggetti appartenenti al gruppo NS indossavano gli otoprotettori forniti dal datore di lavoro durante l'intero turno lavorativo. Fra i soggetti del gruppo NS il 30% lamentano una ipoacusia da esposizione pregressa a rumore dovuta ad esposizioni elevate in altri comparti produttivi. Tutti i soggetti appartenenti al gruppo S erano di nazionalità italiana ed avevano sempre svolto la stessa mansione lavorativa presso la stessa azienda con una durata della vita professionale che andava da un massimo di 26 a un minimo di 5 anni e con una media di 20.3 anni. Nella organizzazione dell'azienda allora vigente, le mansioni che comportavano esposizione a sorgenti di rumore di livello elevato venivano svolte in locali separati rispetto a quelli in cui operavano gli addetti del gruppo S, che risultavano, pertanto, esposti a livelli di esposizione personale quotidiano Lex,8h piuttosto bassi. Tuttavia, poiché quella organizzazione del lavoro era piuttosto recente (meno di 10 anni), mentre i lavoratori esposti da molti anni avevano sicuramente operato in ambienti molto più complessi dal punto di vista espositivo, per cercare di isolare gli effetti di ototossicità del rumore e dello stirene (ed eventualmente di altri solventi) all'interno dei gruppi NS e S sono stati selezionati i seguenti sottocampioni al

fine di poter meglio discriminare gli effetti ototossici di rumore e stirene (ed altri solventi):

I gruppi NSY e SY, ciascuno composto di 3 soggetti, includevano i più giovani soggetti del gruppo NS e S con un'esposizione professionale totale pari a $t_{exp_life} < 10$ anni. Questa ulteriore selezione ci ha anche permesso di escludere tutti i possibili effetti di perdita di udito associati all'età. Infatti, l'età media dei lavoratori di questi sottogruppi era rispettivamente di 34 e 32 anni, approssimativamente in linea con quella del gruppo di controllo.

Per ogni soggetto è stato fornito il risultato del test audiometrico effettuato nell'ambito della sorveglianza sanitaria. Lo shift di soglia audiometrica, PTA espresso in dB HL, è stato valutato a 500 Hz, 1, 2, 3, 4, 6 e 8 kHz a passi di 5 dB a partire da un livello minimo di 20 dB, considerato come massimo shift compatibile con la definizione standard di normoacusia (PTA = 20 dB a tutte le frequenze audiometriche fra 1 e 6 kHz). Per questa ragione i dati audiometrici disponibili hanno fornito una misura quantitativa della soglia solo sopra i 20 dB, così che non si è potuta investigare nessuna correlazione tra soglie audiometriche, livelli di esposizione e livelli delle OAEs. È interessante notare che nessuna soglia audiometrica eccedeva i 30 dB ad ogni frequenza, in tal modo ogni orecchio si sarebbe potuto classificare come normale o affetto solo da una leggerissima perdita. Mentre tutti i controlli risultavano audiometricamente normali, una soglia di 25 e di 30 dB è stata rilevata in circa il 30% degli orecchi esposti, sia per il gruppo NS che per quello S, nelle bande audiometriche di 4, 6, e 8 kHz. Nelle bande di 2 e 3 kHz, tutte le soglie misurate si mantenevano uguali o sotto i 20 dB di hearing loss, anche nei soggetti esposti, mentre una soglia di 25 dB ad 1 kHz è stata misurata in due degli orecchi del gruppo NS.

2.2 ESPOSIZIONE ALLO STIRENE

Dodici soggetti non esposti sono stati utilizzati come campione di controllo per il monitoraggio biologico. Purtroppo, nel caso della misura delle OAE, è stato possibile utilizzare solo 4 soggetti come campione di controllo (età media 34.3 anni, massima 42 anni, minima 27 anni). L'esposizione professionale a rumore è stata valutata mediante fonometri indossabili Quest DLX-1.

Un'accurata valutazione dell'esposizione individuale allo stirene è stato uno dei principali compiti di questo studio. L'uso di differenti tecniche ci ha permesso di fornire una descrizione esaustiva riguardo l'esposizione a questo solvente.

L'esposizione ambientale allo stirene è stata valutata mediante prelievi personali con campionamento diffusivo su opportuno substrato di arricchimento (Radiello), seguito da estrazione chimica e analisi mediante gas cromatografia di massa (GC/MS).

Si è potuto effettuare un accurato monitoraggio biologico sfruttando l'analisi delle matrici prodotte dallo stirene nella saliva e nelle urine, ottenendo in tal modo una precisa valutazione dell'esposizione a tale solvente. Per quanto riguarda la matrice salivare il monitoraggio biologico è stato eseguito attraverso la determinazione dei solventi in

saliva, applicando il metodo GC/MS con campionatore a spazio di testa statico, messo a punto recentemente (Gherardi *et al.*, 2010).

L'interesse per la saliva risiede nel fatto che essa risulta promettente quale matrice per il monitoraggio biologico di solventi pericolosi (Soo-Quee e Choon-Huat, 2007). Il vantaggio principale, rispetto ad altre matrici biologiche, quali il sangue e l'urina, è rappresentato dal fatto che come procedura risulta meno invasiva. Il monitoraggio biologico in matrice urinaria è consistito nella determinazione del contenuto urinario di acido mandelico (MA) e di acido fenilgliosilico, (PGA), che costituiscono i principali prodotti metabolici di ossidazione dello stirene. La tecnica adoperata per la determinazione dei metaboliti sopra indicati con HPLC/MS/MS e diluizione isotopica è stata messa a punto di recente (Paci *et al.*, 2010). L'ACGIH suggerisce come valore limite biologico (BEL) per questi metaboliti una concentrazione totale (MA + PGA) di 400 mg/g di creatinina nelle urine di fine turno.

2.3 MISURE DI OAE

TEOAEs e DPOAEs sono state registrate utilizzando il sistema portatile ILO292 (Otodynamics, Ltd., Hert, UK). In particolare le TEOAEs sono state acquisite nella modalità standard "derived linear" di ILO, usando uno stimolo transiente (click) ad un livello di picco di (80 ± 3) dB SPL. I livelli di segnale e di rumore delle TEOAEs sono stati calcolati in bande di terzi di ottava, nel range di frequenza tra 500 e 5000 Hz. I DPOAEs sono state registrate nel range tra 1000 e 6400 Hz, usando un rapporto tra i toni primari $f_2/f_1=1.22$ con ampiezze $A_1=65$ dB e $A_2=55$ dB, con risoluzione spettrale di 1/3 di ottava.

Sui dati delle OAE è stata applicata una regola di selezione basata sul SNR e il livello assoluto di rumore. I livelli delle OAE sono stati comparati con il livello di rumore corrispondente alla stessa banda di frequenze. I livelli di OAE con SNR negativo non sono stati scartati, ma sono stati sostituiti con il corrispondente livello di rumore misurato. Nella letteratura delle OAE, i dati con SNR negativo (o leggermente positivo ma più basso di una data soglia che è tipicamente fissata a 3,6, o persino 10 dB) sono spesso scartati. Le regole di selezione dei dati basate sull'SNR sono spesso un punto delicato, in particolare quando, come in questo caso, la variabile di uscita (livello delle OAE), che è considerata come una misura della funzionalità cocleare, è fortemente correlata allo stesso SNR. Sebbene ogni livello misurato vicino al livello di rumore non possa essere considerato affidabile da un punto di vista quantitativo, esso contiene ancora delle informazioni specifiche, in effetti il vettore somma del segnale e del rumore risulta in qualche modo attorno al livello del rumore misurato. Questa informazione ci permette di fissare un limite superiore al livello del segnale, dell'ordine del livello del rumore. Escludendo dall'analisi statistica questa informazione si introduce un duplice bias: nell'ambito di una data popolazione si selezionano quei soggetti con i livelli di OAE più alti, e tra i soggetti con livelli di OAE simili, tutti vicini al livello del rumore, si selezionano quelli (o quelle bande di frequenze) per le quali la somma complessa del

segnale e del rumore produce, casualmente, i livelli misurati più alti. La scelta in questo studio, sebbene ovviamente afflitta da un certo grado di arbitrarietà, è stata quella di ridurre questo bias nell'analisi statistica. In aggiunta è stata applicata una ulteriore regola di selezione, basata sul livello assoluto del rumore, rigettando tutte le misure per le quali il livello del rumore eccedeva di più di 6 dB il livello medio del rumore misurato in quella banda di frequenza. Un'eccezione a questa regola è stata quella di accettare le misure di OAE con $SNR > 6$ dB, poiché, in questo caso, un elevato livello anormale del fondo di rumore non avrebbe significativamente perturbato il livello di segnale misurato. Abbiamo anche verificato che il livello medio del fondo di rumore non fosse significativamente differente per i vari gruppi e sottogruppi analizzati in questo studio.

Il filtraggio nel dominio tempo-frequenza (per maggiori dettagli vedi Moleti *et al.*, 2012b) richiede di eseguire una trasformata wavelet dell'originale forma d'onda temporale (nel caso delle TEOAE) o dello spettro complesso (per le SFOAEs e i DPOAEs), che produce un set di coefficienti wavelet che sono funzione del ritardo temporale τ e della frequenza f . Selezionando solo i coefficienti wavelet i cui τ ed f sono in una data relazione, ed effettuando la trasformata inversa wavelet dei coefficienti filtrati, si ottengono gli spettri filtrati che includono i contributi di specifici meccanismi di generazione delle OAE e/o di specifiche regioni cocleari.

Per ragioni pratiche, tutti i calcoli sono stati eseguiti nel dominio della frequenza, cosicché le convoluzioni nel dominio del tempo si sono ridotte a semplici prodotti di spettri complessi.

Nella Figura 1 sono mostrati i grafici bidimensionali tempo-frequenza dell'intensità per due orecchi.

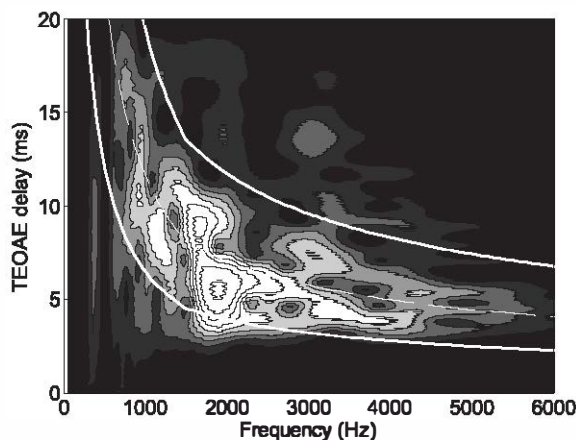


Figura 1: Il filtraggio tempo-frequenza della risposta delle TEOAE è eseguito selezionando i coefficienti wavelet entro la regione delimitata all'interno delle curve. In particolare, la componente LL è ottenuta dalla regione compresa tra la linea tratteggiata e la sovrastante linea continua. Al di sopra della linea continua superiore sono visibili componenti a latenza doppia, associate a riflessioni intracocleari fra la base e il sito risonante.

La maggior parte dell'intensità misurata è confinata tra due spesse linee continue, le quali dovrebbero includere entrambe le componenti LL e SL (rispettivamente, sopra e sotto la curva sottile). Come un possibile miglioramento rispetto a quello che è stato fatto in recenti studi (vedi Sisto *et al.* 2013a) queste curve sono delle leggi quadratiche di potenza il cui esponente cambia improvvisamente alla frequenza di 1.5 kHz, in acconto alla violazione dell'invarianza di scala (o transizione apicale-basale) che è tipicamente osservata a questa frequenza, e che è responsabile, per esempio, della pendenza negativa della fase della componente generatrice delle DPOAE sotto gli 1.5 kHz (Dhar *et al.*, 2011).

Le equazioni delle curve mostrate in **Figura 1** sono le seguenti:

$$\tau_i(f) = \begin{cases} c_i a_l \left(\frac{f}{|kHz|} \right)^{-b_l} & f < 1.5 \text{ kHz} \\ c_i a_h \left(\frac{f}{|kHz|} \right)^{-b_h} & f > 1.5 \text{ kHz} \end{cases} \quad (1)$$

Con $c_i=0.5, 0.9$ (linea sottile), 1.5, $a_l = 13\text{ms}$, $b_l = 0.9$, $b_h = 0.5$, e $a_h = 1.5^{b_h-b_l} a_l$, per garantire la continuità.

Sempre in fig. 1 (superiore) le doppie riflessioni intracocleari sono riconoscibili come spot al di sopra della linea continua superiore, con la stessa frequenza e la doppia latenza delle corrispondenti componenti della riflessione primaria. Nell'immagine inferiore è visibile un'emissione spontanea rappresentata dalla caratteristica struttura verticale evidenziata nell'ellisse.

2.4 ANALISI STATISTICA

Come test preliminare della significatività statistica è stata eseguita un'analisi multivariata della varianza (MANOVA) delle differenze tra i vari gruppi di esposti (C, NS e S nel primo test, e poi C, NSY e SY) dei livelli dei DPOAE e delle TEOAE in bande spettrali di terzi di ottava: è stato scelto questo test poiché le variabili di uscita considerate (livelli delle OAE in bande di terzi di ottava) non sono statisticamente indipendenti l'una dall'altra. In questo caso si è adottato convenzionalmente un livello di significatività $p < 0.05$.

Una comparazione *post hoc* a coppie tra le medie delle OAEs dei tre gruppi (C, NS e S in un primo test, e poi C, NSY e SY) è stata effettuata mediante un *t*-test con una deviazione standard cumulativa. I valori corretti di p sono stati calcolati con la correzione di Holm.

Sono stati studiati anche modelli a regressione lineare variata e multivariata. Tutte le analisi statistiche sono state svolte utilizzando il software statistico R (R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria).

I livelli delle OAE a tutti i toni primari di frequenza f_2 sono stati correlati al logaritmo naturale (\log_e) della concentrazione di PGA e MA nelle urine, moltiplicato per la radice quadrata del tempo totale di esposizione durante la vita. Sono inoltre stati calcolati i coefficienti di determinazione R^2 , i coefficienti di regressione β e il t -test per la significatività della pendenza β . Il coefficiente di regressione β rappresenta così il tasso di modificazione dell'ampiezza del segnale delle OAEs in dB ad una specifica frequenza f_2 in funzione dell'esposizione allo stirene.

3 - RISULTATI

3.1 ESPOSIZIONE ALLO STIRENE

Nei soggetti esposti, l'esposizione ambientale a stirene valutata da Radiello era dello stesso ordine dell' ACGIH TLV di 20 ppm (85,2 mg/m³), con un valore medio di 50 mg/m³ (valore min. = 4,9 mg/m³, max = 150 mg/m³, dev. st. = 38 mg/m³).

L'esposizione all'inizio e alla fine del turno di lavoro è stata calcolata, per ogni soggetto, facendo la media dei dati di due giorni di campionamento. La differenza tra la concentrazione all'inizio e alla fine del turno nel gruppo dei lavoratori addetti allo stampaggio era statisticamente significativa (Student t -test con $p < 0,008$). Le differenze tra i controlli e i lavoratori dello stampaggio erano statisticamente significative sia all'inizio ($p < 6 \cdot 10^{-5}$) che alla fine del turno di lavoro ($p < 2 \cdot 10^{-6}$).

È interessante notare che, nei soggetti addetti allo stampaggio, le concentrazioni di MA e PGA rimanevano elevate anche all'inizio del turno di lavoro, mostrando che il tempo di recupero notturno non era sufficiente per metabolizzare completamente lo stirene assorbito durante il turno di lavoro.

La concentrazione ambientale individuale fornisce una misura locale caratteristica dell'ambiente di lavoro, mentre la concentrazione dei metaboliti dello stirene nell'urina fornisce invece una stima del quantitativo di solvente che viene effettivamente inalato ed assimilato da quel particolare soggetto. La correlazione tra i due parametri dovrebbe quindi risentire della variabilità inter-soggettiva dei sistemi respiratori e metabolici. Un rilevante risultato di questo studio è stata la buona correlazione trovata tra i dati ambientali del Radiello e le concentrazioni di MA+PGA in urina riscontrate a fine turno. Per questo confronto erano disponibili tredici misurazioni da dieci soggetti, due dal gruppo NS e otto dal gruppo S. Il fit della legge di potenza corrispondente alla relazione lineare tra i logaritmi delle concentrazioni, risulta piuttosto buona ($R^2 = 0,89$).

Da un punto di vista quantitativo, l'uso di metodi altamente specifici quali l' HPLC-MS/MS richiede una certa cautela. La ACGIH TLV di 85,2 mg/m³, che è riferito alla concentrazione ambientale di stirene nell'aria, è abitualmente tradotto in un Indice di

Esposizione Biologica (BEI) relativo alla concentrazione di metaboliti dello stirene nell'urina pari a 400 mg/g di creatinina nell'urina di fine turno. Questa corrispondenza si basa sull'uso della HPLC con spettrometria UV (HPLC-UV), che è una tecnica meno specifica di quella utilizzata in questo studio. La concentrazione di MA+PGA estrapolata corrispondente alla ACGIH TLV ambientale ammonta a solo il 60% del valore BEI. Questo fenomeno è spiegato dal fatto che il metodo altamente specifico (HPLC-MS/MS) utilizzato in questo lavoro produce dei livelli di metaboliti urinari più affidabili ma sistematicamente più bassi di quelli ottenuti con tecniche meno specifiche, quale la HPLC-UV (Tranfo *et al.*, 2012). Per tali motivi si è reso necessario l'uso della curva di calibrazione, poiché la comparazione diretta dei dati della HPLC-MS/MS con il limite BEI di 400 mg/g di creatinina rischia di sottovalutare l'esposizione a stirene.

3.2 OAES

3.2.1 DPOAE

In **Figura 2** è mostrata la differenza media rispetto ai controlli dei livelli delle DPOAE in bande di terzi di ottava in funzione dello stimolo di frequenza primaria f_2 per il gruppo NS dei soggetti esposti simultaneamente a rumore e stirene, e il gruppo S, di esposti a concentrazioni più elevata di stirene ma a livelli più bassi di rumore. Gli errori statistici sulle differenze medie mostrate in Fig.2 sono dell'ordine di 1-2dB, e le corrispondenti barre di errore non sono riportate per preservare la leggibilità della figura.

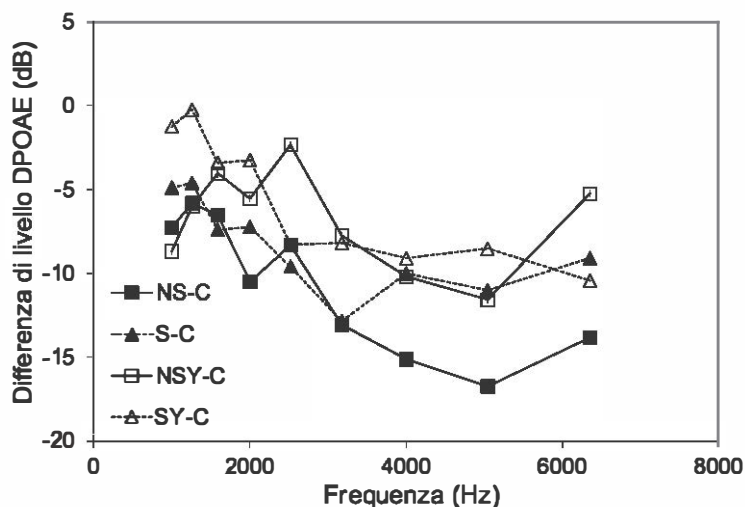


Figura 2: Differenza rispetto ai controlli dei livelli dei DPOAE per i vari gruppi e sottogruppi in bande di un terzo di ottava. La differenza è significativa in tutte le bande di frequenza, anche tenendo conto della correzione di Holm per la molteplicità.

I DPOAEs sono capaci di discriminare ad un livello statisticamente significativo il gruppo di controllo dagli esposti appartenenti ad entrambi i gruppi S e NS, con una efficienza di discriminazione migliore nel range di frequenze più alte. Al fine di poter meglio discriminare gli effetti dell'esposizione allo stirene sulla funzionalità cocleare, si è effettuata una comparazione anche tra i gruppi NSY e SY e i controlli. In quest'ultima, i sottogruppi selezionati eguagliavano anche l'età media dei controlli, così che si potessero evitare anche eventuali effetti di perdita d'udito legati all'età.

I risultati mostrati in **Figura 2** confermano che si osserva ancora una differenza significativa in un ampio range di frequenze.

Queste evidenze qualitative sono state quantitativamente confermate dall'analisi statistica. Il gruppo di esposizione è stato trattato come una variabile a tre livelli che includeva i soggetti esposti appartenenti al gruppo NS, il gruppo S e il gruppo C.

Nella **Tabella 1** sono mostrati i risultati del test MANOVA, insieme con quelli dell'analisi singola univariata della varianza (ANOVA), test eseguiti per ciascuna banda di frequenze. I due test riportano risultati statisticamente significativi, in tutte le bande, anche nel caso in cui si comparano i gruppi NSY e SY con il controllo C.

Nella **Tabella 2** è invece presentata l'analisi comparativa a coppie effettuata *post hoc* sui livelli di DPOAE dei tre gruppi; in tale analisi i valori di p del t -test sono stati ottenuti eseguendo la correzione di Holm. Differenze statisticamente rilevanti sono state evidenziate tra gruppo di controllo e gruppi NS e S in quasi tutte le bande di frequenze.

Tabella 1: Test MANOVA ed ANOVA applicati ai DPOAE del gruppo di controllo (C) e dei gruppi NS, S, nonché del controllo e dei sottogruppi NSY, SY, per quali il periodo totale di esposizione durante la vita era sotto i 10 anni e l'età media coincideva con quella dei controlli.

	ALL EARS		$t_{exp} < 10$ yrs	
MANOVA	F value	$p(F)$	F value	$p(F)$
	4.59	$1 \cdot 10^{-7}$	5.04	$1 \cdot 10^{-6}$
ANOVA	F value	$p(F)$	F value	$p(F)$
DPI000	6.54	0.003	13.8	$3 \cdot 10^{-3}$
DPI250	5.49	0.006	9.16	$6 \cdot 10^{-4}$
DPI600	8.56	$5 \cdot 10^{-4}$	10.4	$3 \cdot 10^{-4}$
DP2000	10.6	$1 \cdot 10^{-4}$	12.1	$9 \cdot 10^{-5}$
DP2500	9.3	$3 \cdot 10^{-4}$	6.79	0.003
DP3200	17.7	$6 \cdot 10^{-7}$	16.0	$1 \cdot 10^{-5}$
DP4000	21.5	$5 \cdot 10^{-8}$	24.0	$2 \cdot 10^{-7}$
DP5000	23.6	$2 \cdot 10^{-7}$	25.7	$1 \cdot 10^{-7}$
DP6400	14.8	$4 \cdot 10^{-6}$	8.37	0.001

Tabella 2: Significatività statistica relativa ai dati dei DPOAE della tabella 1.

	ALL EARS		$t_{exp} < 10$ yrs	
	C/NS	C/S	C/NSY	C/SY
DP1000	0.008	n.s.	$1 \cdot 10^{-4}$	n.s.
DP1250	0.03	n.s.	0.002	n.s.
DP1600	0.004	0.003	$3 \cdot 10^{-4}$	n.s.
DP2000	$6 \cdot 10^{-4}$	0.007	$7 \cdot 10^{-5}$	n.s.
DP2500	0.001	$1 \cdot 10^{-4}$	0.01	0.006
DP3200	$5 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-7}$	$9 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-4}$
DP4000	$1 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-4}$
DP5000	$2 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-7}$	0.01
DP6400	$4 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-4}$	n.s.

Restringendo il confronto ai sottogruppi NSY e SY, differenze rilevanti si sono osservate tra gruppo C e NSY per $f > 1.6$ kHz, mentre le differenze tra i gruppi C e SY diventano evidenti solo tra 2.5 e 5 kHz.

E' stata quindi studiata una opportuna curva dose-risposta nel caso dei soggetti esposti a stirene, correlando i livelli dei DPOAE, usati come variabile di uscita, alla concentrazione urinaria dei metaboliti dello stirene, usata come la miglior approssimazione della dose effettivamente inalata. Per tener conto del fatto che le OAE nelle differenti bande sono comunque variabili correlate, si è dovuto eseguire il fit di modelli a regressione lineare multivariata, includendo anche le misure dei DPOAE di orecchio destro e sinistro a nove frequenze di test, riuscendo ad includere il tutto in unico modello statistico. Poiché l'effetto studiato è fortemente legato all'esposizione cronica dei soggetti, anche l'intera vita espositiva, t_{exp} , è stata inclusa tra i predittori lineari. Il modello scelto per l'analisi lineare multivariata è del tipo:

$$\text{mod} = \ln(\text{DPOAE} \sim (\text{PGA} + \text{MA}) * t_{exp}^{\alpha}), \quad (2)$$

dove "DPOAE" sta per una combinazione lineare della risposta dei DPOAE nelle varie bande.

Alla fine, il modello scelto per meglio rappresentare il modello dose-risposta è stato il seguente (si è escluso MA poiché non aveva un effetto statisticamente significativo):

$$\text{mod} = \ln(\text{DPOAE} \sim (\text{PGA}) * t_{exp}^{0.5}).$$

Il modello a regressione multivariata che correla le ampiezze dei DPOAE per le diverse bande al quantificatore di dose scelto per l'esposizione a stirene è statisticamente significativo (Statistica F con $p = 0.03$).

Nella **Tabella 3** sono riportati per ogni banda di frequenze i valori dei coefficienti β relativi alle regressioni multivariate. Si evidenzia un' evidente pendenza negativa β in tutto il range di frequenze dei DPOAE.

Tabella 3: Vengono mostrati i parametri della regressione lineare multivariata relativi ai dati dei DPOAE e delle TEOAE. Il coefficiente β è la pendenza della relazione tra la concentrazione di PGA (moltiplicata per la radice quadrata del tempo di esposizione espresso in anni) e livelli delle OAE espressi in dB SPL. Il tutto è espresso in unità di $(10^{-2} \text{ dB}/(t^{0.5} \text{ mg(PGA)}/\text{g(creatinina)}))$.

Frequency (Hz)	DPOAE		TEOAE		TEOAE LL	
	β	p(β)	β	p(β)	β	p(β)
500			-1.3	n.s.	-1.1	n.s.
625			-2.2	0.009	-1.7	0.002
800			-1.9	0.001	-2.0	0.003
1000	-2.3	0.03	-1.6	0.05	-0.8	n.s.
1250	-3.3	0.002	-1.8	0.03	-2.0	0.01
1600	-3.1	0.004	-2.2	0.01	-3.3	0.002
2000	-2.3	0.03	-1.2	n.s.	-2.0	0.05
2500	-3.7	0.001	-0.9	n.s.	-2.1	0.04
3200	-3.5	$7 \cdot 10^{-4}$	-1.5	n.s.	-2.0	0.05
4000	-3.6	0.001	0.0	n.s.	0.0	n.s.
5000	-3.1	0.003	0.0	n.s.	0.0	n.s.
6400	-2.5	0.02				
Average 1 to 5 kHz	-3.1		-1.3		-1.5	

3.2.2 TEOAE

Per i dati non filtrati delle TEOAE è stato applicato lo stesso tipo di analisi statistica usata per i DPOAE. In **Figura 3** è mostrata la differenza media rispetto ai controlli dei livelli delle TEOAE in bande di terzi di ottava per i gruppi di esposti S e NS, la rappresentazione è analoga a quella della **Figura 2**. In **Figura 3** sono riportate anche le differenze tra esposti e controlli ottenute restringendo l'analisi ai dati dei sottogruppi NSY e SY.

Da un confronto visuale con la **Figura 2**, si può notare una notevole somiglianza fra gli andamenti spettrali delle quattro differenze misurate per i DPOAE e per le TEOAE, con un leggero shift frequenziale. Si nota anche immediatamente che le differenze rispetto ai controlli sono più pronunciate nel caso dei DPOAE. L'applicazione del filtro tempo-frequenza per selezionare le sole componenti LL non migliora significativamente la capacità diagnostica delle TEOAE.

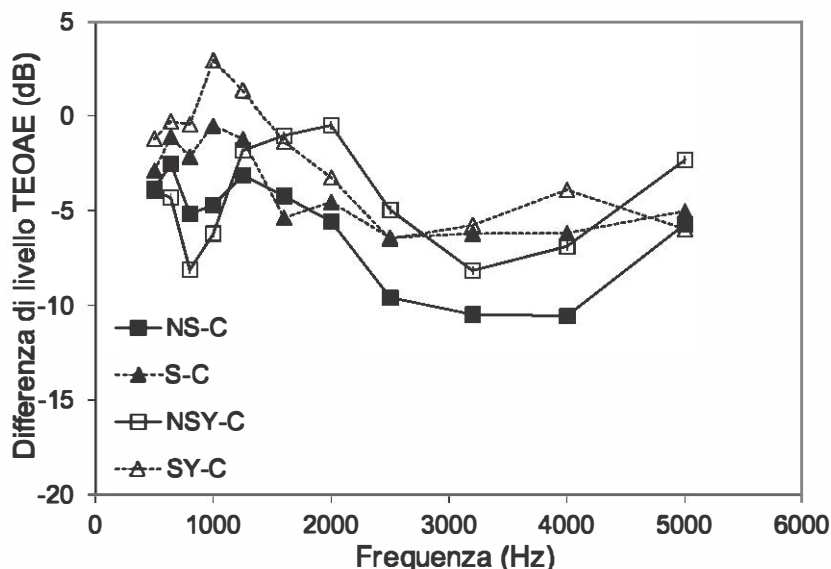


Figura 3: Le TEOAE risultano meno efficaci rispetto i DPOAE nel discriminare i controlli dai gruppi NS, S, come anche dai sottogruppi NSY, SY. Il loro potere diagnostico inferiore è confermato comparando i risultati statistici evidenziati nelle Tabelle 4 e 5 con quelli dei DPOAE mostrati nelle Tabelle 2 e 3.

I risultati dei test MANOVA ed ANOVA relativi a ciascuna banda di frequenza sono mostrati nella Tabella 4. Come per i DPOAE è stata eseguita un'analisi comparativa a coppie sui tre gruppi di esposti e i risultati sono riportati in Tabella 5. I risultati relativi alle TEOAE sono simili a quelli precedentemente trovati per i DPOAE, con una capacità discriminatoria delle TEOAE che risulta piuttosto buona solo alle alte frequenze (sopra i 2.5 kHz), ma sistematicamente meno buona rispetto a quella dei DPOAE su tutto l'intero range di frequenze considerate.

4 - DISCUSSIONE

E' già stato dimostrato in precedenti studi (Lucertini *et al.*, 2002; Sisto *et al.*, 2007), che test basati su OAE sono in grado di discriminare ad un livello statisticamente significativo i gruppi di esposti dal gruppo di controllo in caso di esposizione al rumore. Nel presente lavoro si è anche dimostrato che i livelli misurati di esposizione allo stirene sono sufficienti ad influenzare significativamente il livello della risposta delle OAE. Con il monitoraggio ambientale, si è visto che i soggetti appartenenti al gruppo S, sono

Tabella 4: Test MANOVA ed ANOVA applicati ai dati delle TEOAE tra controlli e i gruppi NS, S e tra controlli e sottogruppi NST, SY. Nelle ultime quattro colonne lo stesso test è stato applicato alla sola componente LL della risposta TEOAE ottenuta con la procedura di filtraggio nel dominio tempo-frequenza descritta per la **Figura 1** I valori di p segnati in *italico* sono quelli che non hanno passato la correzione di Holm-Bonferroni per la molteplicità.

	ALL EARS		$t_{\text{exp}} < 10$ yrs		ALL EARS LL		$t_{\text{exp}} < 10$ yrs LL	
MANOVA	F value	$p(F)$	F value	$p(F)$	F value	$p(F)$	F value	$p(F)$
	3.94	$8 \cdot 10^{-7}$	2.91	$8 \cdot 10^{-4}$	2.16	$6 \cdot 10^{-3}$	3.88	$7 \cdot 10^{-4}$
ANOVA	F value	$p(F)$	F value	$p(F)$	F value	$p(F)$	F value	$p(F)$
TE500	2.91	n.s.	3.54	<i>0.04</i>	3.07	<i>0.05</i>	4.77	<i>0.02</i>
TE625	0.82	n.s.	2.82	n.s.	2.66	n.s.	4.14	<i>0.03</i>
TE800	3.68	<i>0.03</i>	6.80	0.003	1.91	n.s.	3.10	n.s.
TE1000	3.57	<i>0.03</i>	6.70	0.003	1.99	n.s.	2.73	n.s.
TE1250	1.34	n.s.	2.42	n.s.	1.32	n.s.	1.25	n.s.
TE1600	4.60	<i>0.01</i>	2.12	n.s.	3.48	0.04	0.80	n.s.
TE2000	3.91	<i>0.02</i>	2.75	n.s.	2.67	n.s.	0.89	n.s.
TE2500	13.6	$1 \cdot 10^{-5}$	15.2	$2 \cdot 10^{-5}$	11.7	$6 \cdot 10^{-5}$	16.4	$2 \cdot 10^{-5}$
TE3200	13.2	$1 \cdot 10^{-5}$	16.4	$9 \cdot 10^{-6}$	8.87	$5 \cdot 10^{-4}$	11.6	$2 \cdot 10^{-4}$
TE4000	15.1	$4 \cdot 10^{-6}$	15.4	$1 \cdot 10^{-5}$	8.15	$8 \cdot 10^{-4}$	6.67	0.004
TE5000	7.53	0.001	6.00	0.006	6.05	0.004	5.79	<i>0.008</i>

Tabella 5: Risultati del t-test applicato ai dati delle TEOAE tra controlli (C) e gruppi NS, S e tra controlli e sottogruppi NSY, SY. Nelle ultime tre colonne lo stesso test è applicato alla componente LL della risposta delle TEOAE. Qui la correzione di Holm è stata applicata direttamente ai valori ottenuti di p .

	ALL EARS		$t_{exp} < 10$ yrs		ALL EARS LL		$t_{exp} < 10$ yrs LL	
	C/NS	C/S	C/NSY	C/SY	C/NS	C/S	C/NSY	C/SY
TE500	n.s.	n.s.	0.05	n.s.	0.05	n.s.	0.01	n.s.
TE625	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0.05	n.s.
TE800	0.02	n.s.	0.002	n.s.	n.s.	n.s.	0.03	n.s.
TE1000	0.04	n.s.	0.004	n.s.	0.05	n.s.	0.01	n.s.
TE1250	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
TE1600	n.s.	0.005	n.s.	n.s.	n.s.	0.006	n.s.	n.s.
TE2000	0.02	0.02	n.s.	n.s.	n.s.	0.02	n.s.	n.s.
TE2500	$3 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-7}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-6}$	0.0001
TE3200	$6 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-5}$
TE4000	$6 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$
TE5000	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	0.04	0.004	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	0.009	$6 \cdot 10^{-4}$

esposti ad un livello di concentrazione di stirene dell'ordine dell'ACGIH TLV di 20 ppm (85.2 mg/m³).

Le differenze statisticamente significative osservate tra controlli e gruppi di esposti, sono tipicamente maggiori nel caso dei DPOAEs che nel caso dei TEOAEs.

E' stata anche determinata una curva dose-risposta, che correla i livelli delle OAE in bande di terzi di ottava all'esposizione allo stirene, espressa in funzione dei livelli di PGA nell'urina e dell'esposizione complessiva durante la vita. In questo studio è stato anche preliminarmente dimostrato che la concentrazione di PGA è strettamente correlata alla concentrazione ambientale di stirene. E' stato inoltre mostrato che le ampiezze delle OAE sono anticorrelate all'esposizione a stirene, con pendenze statisticamente significative in un ampio range di frequenze. Anche in questo caso la correlazione è risultata sempre maggiore, e le pendenze più accentuate nel caso delle DPOAEs che in quello delle TEOAEs.

Recentemente, è stato realizzato nei laboratori INAIL un sistema di acquisizione e di analisi delle DPOAE capace di registrare spettri ad alta risoluzione, in modo da poter discriminare il generatore principale dalle componenti di riflessione nel segnale di risposta. Il nuovo sistema di acquisizione permette anche di utilizzare la stimolazione controlaterale (CAS) per evidenziare eventuali alterazioni del sistema efferente Medio-Olivo-Cocleare (MOC). Un'analisi preliminare dei dati forniti sugli stessi soggetti esposti e sui controlli con il nuovo sistema ha confermato i risultati qui riportati, evidenziando una diversa sensibilità dei DPOAE a frequenze basse e alte in funzione del tipo di esposizione (rumore o stirene). La componente SL dei DPOAE risulta più sensibile dei DPOAE totali e della componente da riflessione, mentre l'effetto della CAS è di difficile interpretazione, e necessiterà uno studio specifico.

5 - CONCLUSIONI

I test basati sulle OAEs sono capaci di discriminare ad un livello statisticamente significativo i gruppi di esposti dal gruppo di controllo, sia nel caso in cui la maggior esposizione sia dovuta allo stirene che nel caso in cui l'agente potenzialmente ototossico principale sia il rumore. E' interessante notare che tale capacità di discriminazione si è potuta applicare sia ad un range di normale soglia uditiva (a 2 e 3 kHz tutte le soglie uditive erano ≤ 20 dB HL) o ad un range di leggera perdita uditiva (tutti i soggetti hanno mostrato soglie uditive inferiori a 30 dB a tutte le frequenze audiometriche).

In un sottocampione di soggetti esposti a stirene con bassa esposizione al rumore e breve esposizione pregressa in vita, è stata evidenziata una degenerazione della funzionalità cocleare che si è manifestata con una significativa riduzione dei segnali otoacustici. Questa degenerazione della funzione uditiva può essere attribuita sia al solo effetto ototossico dello stirene o a un qualche effetto sinergico dello stirene insieme a moderati livelli di rumore (da investigare ulteriormente), poiché in questo sottocampione è stato

possibile escludere sia l'età che un'intensa esposizione al rumore come cause alternative possibili dello spostamento osservato della soglia uditiva.

Inoltre si è evidenziato come la capacità di discriminazione delle TEOAEs sia inferiore di quella dei DPOAEs, e anche raffinando la tecnica utilizzando le TEOAE, adoperando un'analisi tempo-frequenza, non si è riuscito a migliorare significativamente il loro potere diagnostico. Con le correnti limitazioni presenti nei sistemi commerciali di misura delle TEOAE, ci sembra che sia nettamente preferibile l'uso dei DPOAE quali potente ausilio nel monitoraggio di sostanze ototossiche come i solventi.

La ridotta dimensione del campione analizzato nello studio qui riportato, implica che questi risultati necessitino di essere confermati su di un campione sistematicamente più vasto. L'utilizzo di sistemi avanzati di acquisizione e di analisi permetterà di ottenere interpretazioni più accurate dei dati relativi alle OAE, consentendo di sviluppare una metodica ancor più rapida ed affidabile nell'evidenziare precocemente eventuali danni o sofferenze a carico dei lavoratori esposti.

6 - BIBLIOGRAFIA

Campo, P., Loquet, G., Blachere, V., and Roure, M. (1999). "Toluene and styrene intoxication route in the rat cochlea," *Neurotoxicol. Teratol.* 21, 427-434.

Campo, P., Pouyatos, B., Lataye, R., and Morel, G. (2003). "Is the aged rat ear more susceptible to noise or styrene damage than the young ear?," *Noise Health* 5, 1-18.

Dhar, S., Rogers, A., and Abdala, C. (2011). "Breaking away: Violation of distortion emission phase-frequency invariance at low frequencies," *J. Acoust. Soc. Am.* 129, 3115-3122.

Gherardi, M., Gordiani, A., and Gatto, M. P. (2010). "Development and validation of method for analysis of some ototoxic solvents in saliva matrix by headspace gas chromatography/mass spectrometry," *J. Chromatogr. B: Biomed. Appl.* 878, 2391-2396.

Goodman, S. S., Fitzpatrick, D. F., Ellison, J. C., Jesteadt, W., and Keefe, D. H. (2009). "High-frequency click-evoked otoacoustic emissions and behavioral thresholds in humans," *J. Acoust. Soc. Am.* 125, 1014-1032.

Goodman, S. S., Mertes, I. B., and Scheperle, R. A. (2011). "Delays and growth rates of multiple TEOAE components," in *Proceedings of the 11th International Mechanics of Hearing Workshop*, July 16-22, 2011, Williamstown, MA, edited by C. A. Snera and E. S. Olson, *AIP Conf. Proc.* 1403, 279-285.

Hall, A. J., and Lutman, M. E. (1999). "Methods for early identification of noise induced hearing loss," *Audiology* 38, 277–280.

Johnson, A. C., Morata, T. C., Lindblad, A. C., Nylon, P. R., Svensson, E., Krieg, E., Aksentijevic, A., and Prasher, D. (2006). "Audiological findings in workers exposed to styrene alone or in concert with noise," *Noise Health* 8, 45–57.

Kalluri, R., and Shera, C. A. (2007). "Near equivalence of human clickevoked and stimulus-frequency otoacoustic emissions," *J. Acoust. Soc. Am.* 121, 2097–2110.

Lataye, R., Campo, P., and Loquet, G. (2000). "Combined effects of noise and styrene exposure on hearing function in the rat," *Hear Res.* 139, 86–96.

Lataye, R., Campo, P., Pouyatos, B., Cossec, B., Blachere, V., and Morel, G. (2003). "Solvent ototoxicity in the rat and guinea pig," *Neurotoxicol. Teratol.* 25, 30–50.

Lucertini, M., Moleti, A., and Sisto, R. (2002). "On the detection of early cochlea damage by otoacoustic emissions analysis," *J. Acoust. Soc. Am.* 111, 972–978.

Makitie, A. A., Pirvola, U., Pyrkko, I., Sakakibara, H., Riihimäki, V., and Ylikoski, J. (2003). "The ototoxic interaction of styrene and noise," *Hear. Res.* 179, 9–20.

Moleti, A., Botti, T., and Sisto, R. (2012a). "Transient-evoked otoacoustic emission generators in a nonlinear cochlea," *J. Acoust. Soc. Am.* 131, 2891–2903.

Moleti, A., Longo, F., and Sisto, R. (2012b). "Time-frequency domain filtering of evoked otoacoustic emissions," *J. Acoust. Soc. Am.* 132, 2455–2467.

Morata, T. C., Johnson, A. C., Nylen, P., Svensson, E. B., Cheng, J., Krieg, E. F., Lindblad, A. C., Emstgaard, L., and Franks, J. (2002). "Audiometric findings in workers exposed to low levels of styrene and noise," *J. Occup. Environ. Med.* 44, 806–814.

Morata, T. C., Sliwinska-Kowalska, M., Johnson, A. C., Starck, J., Pawlas, K., Zmyslowska-Szmytko, E., Nylen, P., Toppila, E., Krieg, E., Pawlas, N., and Prasher, D. (2011). "A multicenter study on the audiometric findings of styrene-exposed workers," *Int. J. Audiol.* 50, 652–660.

Paci, E., Pigini, D., Caporossi, L., De Rosa, M., Santoro, A., Sisto, R., Papaleo, B., and Tranfo, G. (2013). "Matrix effect in the quantitative determination of Mandelic and Phenylglyoxylic acid in urine samples by HPLC-MS/MS with isotopic dilution," *Current Anal. Chem.* 9, 439–446.

- Pouyatos, B., Campo, P., and Lataye, R. (2002). "Use of DPOAEs for assessing hearing loss caused by styrene in the rat," *Hear. Res.* 165, 156–164.
- Shera, C. A., and Guinan, J. J., Jr. (1999). "Evoked otoacoustic emissions arise by two fundamentally different mechanisms: A taxonomy for mammalian OAEs," *J. Acoust. Soc. Am.* 105, 782–798.
- Sisto, R., Chelotti, S., Moriconi, L., Pellegrini, S., Citroni, A., Monechi, V., Gaeta, R., Pinto, I., Stacchini, N., and Moleti, A. (2007). "Otoacoustic emissions sensitivity to low levels of noise-induced hearing loss," *J. Acoust. Soc. Am.* 122, 387–401.
- Sisto, R., Sanjust, F., and Moleti, A. (2013a). "Input/output functions of different-latency components of transient-evoked and stimulus-frequency otoacoustic emissions," *J. Acoust. Soc. Am.* 133, 2240–2253.
- Sisto, R., Cerini, L., Gatto, M.P., Gherardi, M., Gordiani, A., Sanjust, F., Tranfo, G., Paci, E., and Moleti, A. (2013b). "Otoacoustic emission sensitivity to exposure to styrene and noise," *J. Acoust. Soc. Am.* 134 (5), 3739–3748.
- Sliwiska-Kowalska, M., Zamysłowska-Szmytko, E., Szymczak, W., Kotyło, P., Fiszer, M., Wesolowski, W., and Pawlaczyk-Luszczynska, M. (2003). "Ototoxic effects of occupational exposure to styrene and co-exposure to styrene and noise," *J. Occup. Environ. Med.* 4, 15–24.
- Soo-Quee, K. D., and Choon-Huat, K. G. (2007). "The use of salivary biomarkers in occupational and environmental medicine," *Occup. Environ. Med.* 64, 202–210.
- Sulkowsky, W. J., Kowalska, S., Matyja, W., Guzek, W., Wesolowski, W., Szymczak, W., and Kostrzewski, P. (2002). "Effects of occupational exposure to a mixture of solvents on the inner ear: A field study," *Int. J. Occup. Med. Environ. Health* 15, 247–256.
- Talmdage, C. L., Tubis, A., Long, G. R., and Piskorski, P. (1998). "Modeling otoacoustic emission and hearing threshold fine structures," *J. Acoust. Soc. Am.* 104, 1517–1543.
- Tranfo, G., Gherardi, M., Paci, E., Gatto, M. P., Gordiani, A., Caporossi, L., Capanna, S., Sisto, R., Papaleo, B., Fiumalbi, C., and Garofani, P. (2012). "Occupational exposure to styrene in the fiberglass reinforced plastic industry: Comparison between two different manufacturing processes," *Med. Lav.* 103, 402–412.

Withnell, R. H., Hazlewood, C., and Knowlton, A. (2008). "Reconciling the origin of the transient evoked otoacoustic emission in humans," *J. Acoust. Soc. Am.* 123, 212–221.

Zweig, G., and Shera, C. A. (1995). "The origin of periodicity in the spectrum of evoked otoacoustic emissions," *J. Acoust. Soc. Am.* 98, 2018–2047.

INTERAZIONE SINERGICA TRA RUMORE E VIBRAZIONI NELL'INDURRE DANNI ALL'UDITO

Enrico Marchetti, Teresa Botti, Filippo Sanjust, Floriana Sacco, Renata Sisto

INAIL DC Ricerca DiMEILA – Monteporzio Catone – Roma

1 - INTRODUZIONE

La direttiva europea 2003/10/CE in materia di protezione dei lavoratori contro i rischi derivanti dall'esposizione ad alti livelli di rumore, recepita in Italia nel D. Lgs. 81/08, raccomanda di indicare, nel documento di valutazione dei rischi, l'esposizione simultanea a rumore e ad altri agenti ototossici, quali vibrazioni e solventi organici (stirene, toluene, xilene).

La direttiva, diventata legge dello Stato Italiano non va oltre nel definire le modalità di valutazione del rischio in presenza di esposizioni combinate. Di fatto qualsiasi criterio quantitativo per valutare l'aumento di rischio dovuto all'esposizione sinergica a diversi agenti ototossici è tuttora mancante nella letteratura scientifica nazionale ed internazionale.

Questo lavoro si propone di presentare una panoramica sui risultati ottenuti ad oggi in questo campo di ricerca, in particolare nell'esposizione a rumore e vibrazioni. Lo studio della letteratura fa emergere la necessità di acquisire conoscenza di alcuni specifici aspetti. Particolarmente necessaria è l'identificazione del meccanismo eziologico del danno nella coclea indotto da vibrazione meccanica (MV, *Mechanical Vibration*). Per realizzare ciò diventa una priorità valutare l'energia meccanica che raggiunge l'orecchio interno. Attraverso una rassegna della letteratura si cercherà di definire e sottolineare queste esigenze unitamente alla loro rilevabilità con le moderne strumentazioni e tecniche. Questa rassegna ha dato origine ad un progetto di ricerca articolato che vede coinvolti attori esterni ed interni all'INAIL. Pertanto concluderà il presente lavoro una breve descrizione di tale progetto di ricerca.

2 – LA NASCITA DEL PROBLEMA: GLI STUDI EPIDEMIOLOGICI

Il sospetto che ci fosse un'interazione sinergica tra esposizione a rumore e contestuale esposizione a vibrazioni origina da una indagine epidemiologica svolta sui boscaioli. Nel tempo questa ipotesi si è concretizzata a seguito di più approfondite campagne epidemiologiche di *follow up*. L'evidenza di una interazione

sinergica tra rumore e vibrazioni nell'indurre perdita dell'udito è stato trovato in diversi studi epidemiologici.

Iki et al. (1986) e Miyakita et al. (1987) hanno mostrato una correlazione tra il dito bianco da vibrazione (VWF, *Vibration-induced White Finger*) e la perdita di udito (HL, *Hearing Loss*) in lavoratori forestali e operatori con motosega, rispettivamente. Esami audiometrici hanno mostrato un danno uditivo maggiore in bande ad alta frequenza (ad esempio, 4 kHz, 6 kHz e 8 kHz).

Negli stessi anni, Pyykkö et al. (1981, 1986, 1994), in uno studio longitudinale condotto su boscaioli, hanno trovato un'associazione statisticamente significativa tra uno spostamento permanente della soglia (NIPTS, *Noise-Induced Permanent Threshold Shift*) indotto da rumore ad alta frequenza, o perdita neurosensoriale d'udito (SHL, *Sensorineural Hearing Loss*), e VWF in condizioni espositive tipiche del lavoro in campo. Gli autori hanno proposto, come possibile spiegazione per l'interazione sinergica tra rumore e vibrazioni, un meccanismo di vasocostrizione nei vasi sanguigni cocleari e digitali indotto da esposizione a vibrazioni, dovuto ad attività del sistema nervoso simpatico. Questa ipotesi è stata ripresa in tempi recenti anche da Palmer et al. (2002) e House et al. (2010).

Recentemente, altri studi epidemiologici (Pettersson et al. 2012) hanno evidenziato gli effetti sinergici dell'esposizione simultanea a rumore e vibrazioni mano-braccio (HAV, *Hand-Arm Vibration*) sulla perdita d'udito causata dal rumore. Studi simili sono stati condotti da Silva e Mendes (2005) e da Fernandes e Morata (2002) su lavoratori esposti a vibrazioni al corpo intero (WBV, *Whole-Body Vibration*).

L'evidenza dell'effetto, e l'ipotesi formulata sulla sua eziopatogenesi, danno luogo ad una domanda preliminare: quanta energia meccanica vibratoria arriva dal punto d'ingresso all'orecchio interno? Data anche la differenza tra i punti d'ingresso ed i percorsi che vanno dal mano-braccio e dal corpo intero all'orecchio, la risposta a tale domanda richiede nuove tecniche di misura, differenziate in ragione del percorso delle vibrazioni. L'indagine deve essere, per necessità evidente, condotta in frequenza per calcolare la trasmissibilità meccanica in ciascuna banda di frequenza.

3 - GLI STUDI SUGLI ANIMALI

Studi condotti sull'apparato uditivo su animali da laboratorio hanno dato risultati in apparente contrasto con le risultanze epidemiologiche.

Zou et al. (2001) hanno messo a punto un esperimento su animali (porcellini d'india) per valutare i metodi per prevenire la perdita dell'udito nella chirurgia dell'orecchio, durante la quale delle vibrazioni meccaniche venivano trasmesse direttamente all'orecchio interno. E' stato utilizzato un complesso setup sperimentale per esporre l'osso del canale uditivo esterno dell'animale al suono e alle vibrazioni. Gli autori hanno riportato un significativo spostamento della soglia (TS, *Threshold Shift*) elettrococlearografica (media di 42 dB) nella maggior parte degli animali esposti ad una vibrazione di 250 Hz e $2,6 \text{ m/s}^2$ per 15 min. Però i TS indotti da un'esposizione simultanea a suono e vibrazioni erano significativamente superiori a quelli indotti da solo rumore in appena 2 degli 11 animali esposti.

Sutinen et al. (2007) hanno utilizzato uno shaker elettromagnetico per far vibrare l'osso del canale uditivo esterno dei porcellini d'india (con un range di frequenze da

32 Hz a 1000 Hz e intensità tra 4.2 m/s^2 e 18.8 m/s^2 , e hanno studiato l'effetto indotto dall'esposizione a vibrazioni che si verificano nella chirurgia dell'orecchio medio. La soglia uditiva è stata valutata evocando risposte uditive del tronco encefalico (ABR, *Auditory Brainstem Response*). Gli autori hanno riscontrato perdite di udito più gravi a frequenze più alte (da 500 Hz a 1000 Hz) piuttosto che a frequenze più basse (da 32 Hz a 250 Hz), anche se l'osso temporale ha manifestato una ridotta trasmissività a frequenze più elevate.

Per quanto riguarda gli studi sulle vibrazioni trasmesse al corpo intero (WBV), Bochnia et al. (2005) hanno effettuato un lavoro su porcellini d'india esposti ad una vibrazione sinusoidale (10 Hz, 5 mm di ampiezza e 1.4 g rms) in assenza di rumore. Gli autori hanno riscontrato una modifica nelle guaine mieliniche delle fibre del nervo acustico mediante un microscopio a trasmissione, e un danno strutturale delle cellule ciliate collocate nella regione interna della coclea mediante un microscopio a scansione. Quest'ultima scoperta significa che le WBV inducono la perdita dell'udito nel range delle basse e medie frequenze.

Effetti indotti da WBV sono stati trovati anche da Moussavi-Najarkola et al. (2012, 2012a). Un campione di conigli bianchi della Nuova Zelanda è stato esposto a WBV (lungo l'asse z, a 4-8 Hz e un rms pari a 1.0 m/s^2 per 8 ore al giorno per cinque giorni consecutivi). Sono stati selezionati come biomarcatori significativi i prodotti di distorsione delle emissioni otoacustiche (DPOAEs). L'ipotesi di partenza era che le ampiezze delle DPOAE nei conigli esposti a WBV sarebbero state inferiori a quelle nei conigli di controllo. Nonostante l'ipotesi iniziale, gli autori hanno trovato un effetto opposto, cioè che le ampiezze dei DP alle medie e alte frequenze erano significativamente più grandi per conigli esposti a WBV e aumentavano proporzionalmente alla durata dell'esposizione.

Questi risultati hanno messo in evidenza la complessità del meccanismo di trasmissione delle vibrazioni meccaniche e di generazione del danno acustico.

4 - STUDI SPERIMENTALI SU ESSERI UMANI

I primi studi interessanti sull'esposizione umana alle vibrazioni e al rumore sono apparsi fin dai primi anni '70, realizzati dai ricercatori giapponesi Okada et al. (1972), e Yokoyama et al. (1974).

Nel primo lavoro, cinque studenti sono stati sottoposti a diverse condizioni di esposizione per valutare gli effetti sinergici: WBV (2, 5, 10 Hz a 1 m/s^2 ; 5, 10, 20 Hz a 5 m/s^2 ; 10, 20 Hz a 10 m/s^2) con e senza il rumore emesso dall'apparato vibrante (81 dB SPL - overall), con e senza un rumore additivo (101 dB SPL banda larga), solo vibrazione e solo rumore additivo. Dopo 20 min e 60 min di esposizione alle vibrazioni è avvenuto uno spostamento temporaneo della soglia (TTS, *Temporary Threshold Shift*), mentre un effetto maggiore si è verificato dopo un'esposizione simultanea a vibrazioni e rumore.

Yokoyama et al. hanno sviluppato uno studio simile sulle WBVs riguardante gli effetti sinergici dell'esposizione a rumore e vibrazioni. Il loro protocollo consisteva in tre tipologie di esposizione: WBV (5 Hz e 5.92 m/s^2 , 16.7 Hz e 33.03 m/s^2), rumore (82 dB SPL a banda larga), WBV e rumore contemporaneamente. Gli autori

non hanno trovato effetti significativi con la sola vibrazione. Tuttavia, l'esposizione combinata ha aumentato l'effetto del solo rumore. In particolare, nel caso di esposizione ad una vibrazione di 16.77 Hz, è stata trovata un TTS di circa 13 dB. Gli autori hanno ipotizzato una modifica della microcircolazione sanguigna nell'orecchio interno.

Negli anni successivi, Manninen (1983, 1984, 1985, 1986) ha ampiamente studiato gli effetti combinati di WBV e rumore su soggetti umani. Nello studio del 1983 Manninen ha sviluppato un sistema con una camera di esposizione per una sola persona per effettuare un'esposizione a WBV (asse Z, 5 Hz e 2.12 m/s^2 , 10 Hz e 2.65 m/s^2) sia in condizione isolata che in una condizione combinata con rumore bianco (85, 90, 98 dBA, con differenti larghezze di banda). Ogni sessione di misura era costituita da un periodo di controllo pre-esposizione di 30 minuti, da un'esposizione 16 minuti ripetuta 3 volte con 4 minuti di intervallo post-esposizione e da un periodo di recupero di 15 min. Questo studio ha trovato un effetto sinergico di rumore e vibrazioni nell'indurre TTS uditivi per lo più a 4 kHz e 6 kHz.

Nello studio del 1984, 90 studenti volontari di sesso maschile (età media 22 anni) sono stati sottoposti a esposizioni isolate e combinate delle seguenti categorie: rumore (90 dBA) a banda larga stabile ([0.2, 16.0] Hz); WBV (2.12 m/s^2) sinusoidale (5 Hz - asse Z) a banda larga stocastica ([2.8, 11.2] Hz); lavoro muscolare dinamico ad una temperatura di bulbo secco di 30°C con carichi di 2, 4, 8 W. Sono state considerate le stesse sessioni di misura del lavoro precedente. Sia la soglia uditiva che la frequenza cardiaca (HR, *Heart Rate*) sono state registrate per stimare gli effetti dell'esposizione. Manninen ha scoperto che l'esposizione al rumore provoca TTS, in particolare a 4 e 6 kHz. L'autore ha anche trovato prove che il TTS aumenta con esposizione simultanea a vibrazioni (soprattutto in condizioni di banda larga stocastica) o lavoro muscolare dinamico (soprattutto in condizioni di carico di 2 W). Inoltre, i valori di TTS sono stati influenzati da variazioni di HR. Vale a dire, carichi di lavoro muscolare maggiori ritardano l'incremento del TTS perché la maggiore attività cardiovascolare compensa probabilmente gli effetti vasospastici sulla circolazione sanguigna indotti dall'esposizione a rumore e vibrazioni.

Negli studi del 1985 e del 1986, Manninen ha cominciato a monitorare non solo TTS e HR, ma anche l'ampiezza dell'onda R nell'elettrocardiogramma, la pressione sanguigna diastolica, la pressione sanguigna sistolica, la pressione del polso e il tempo di reazione, misurando i cambiamenti in queste variabili indotti da esposizione al rumore e/o WBV. In particolare, nel 1985 esaminò effetti combinati anche con l'aggiunta di un carico psicologico di tipo competitivo, che ha indotto uno stress in grado di accelerare gli effetti dell'esposizione al rumore ed alle WBV.

Negli stessi anni, Miyakita et al. (1987a) hanno studiato gli effetti sinergici di HAV e rumore. Hanno esposto diciannove soggetti sani ad HAV emesse da una sega a catena (3 m/s^2), al solo rumore, o contemporaneamente ad entrambi. Durante l'esperimento, è stata monitorata la temperatura del terzo dito della mano sinistra per valutare parametri legati alla patologia del dito bianco. Il livello di rumore prodotto dalla motosega era 105 dBA ed è stato usato come fonte di rumore. Pochi soggetti hanno mostrato TTS significativamente maggiori nell'esposizione simultanea ad HAV e rumore rispetto alla condizione di esposizione al solo rumore. Inoltre, l'esposizione al solo rumore era in grado di indurre una diminuzione della temperatura cutanea del dito.

Attualmente, i più importanti studi sperimentali che mostrano evidenze dell'interazione di rumore e vibrazioni nell'indurre TTS uditivi sono stati effettuati da Zhu et al. (1997) e Seidel et al. (1988). I loro lavori sono considerati il riferimento principale per i prossimi studi sugli umani, pertanto saranno illustrati in dettaglio.

Zhu et al. (1997) hanno dimostrato che l'esposizione ad HAV aumenta l'effetto dell'esposizione al rumore nell'indurre TTS. Diciannove soggetti sani sono stati esposti ad HAV (30 m/s^2 rms, 60 Hz), rumore (90 dBA, rumore bianco), e contemporaneamente a vibrazioni e rumore, in intervalli di 24 ore, al fine di evitare effetti residui di esposizioni precedenti. Durante l'esposizione alle vibrazioni, il soggetto era seduto su una sedia e appoggiava la mano destra su una piastra vibrante. Il rumore è stato generato da un audiometro e trasmesso nel condotto uditivo del soggetto attraverso le cuffie dell'audiometro. Ogni esposizione durava 3 minuti con 1 minuto di pausa e ripetuta cinque volte. Al fine di valutare gli effetti derivanti da HAV, rumore e combinazione di entrambi, Zhu et al. hanno registrato i TTS mediante audiometro prima e dopo l'esposizione e durante le pause di prova a 1, 4, 6 kHz. Per tutte queste bande di frequenza, nessun effetto è diventato evidente nel caso di esposizione al solo HAV (nessun TTS), mentre invece l'esposizione ad HAV era in grado di aumentare i TTS indotti dal solo rumore di circa 3.5 dB rispetto alla media (vedi figure 1, 2, 3 in Zhu et al. (1997)). I valori di TTS erano più grandi a 4 kHz e 6 kHz rispetto alle bande di frequenza a 1 kHz (TTS <5 dB), e sono aumentati con la prova di ripetizione.

Lo studio di Zhu et al. ha mostrato un evidente effetto sinergico di rumore e vibrazioni mano-braccio nell'indurre una significativa perdita dell'udito rispetto ai risultati di Miyakita et al. (1987a), le cui condizioni sperimentali hanno probabilmente complicato il loro studio. Tuttavia, entrambi gli autori concordano nel sostenere l'ipotesi di una vasocostrizione nei vasi cocleari e una riduzione dei flussi sanguigni cocleari dal sistema nervoso simpatico, attivato dall'esposizione combinata, come probabile causa dell'effetto sinergico. È ragionevole affermare che la forza di accoppiamento è determinante per valutare la trasmissione dell'MV nella zona del corpo lontana dal punto di entrata, come si dice in Pyykkö et al. (1975). Tuttavia l'esposizione alle vibrazioni manca dei dati sull'accoppiamento tra i soggetti e lo stimolo vibratorio.

Più recentemente, Petterson et al. (2011) hanno esposto soggetti sani giovani al rumore (99 dBA ampio spettro) e/o HAV (6.7 m/s^2 rms ampio spettro) per 20 minuti, riproducendo le condizioni sperimentali di Miyakita et al. (1987a). Analogamente a Miyakita et al. (1987a) e Zhu et al. (1997), Petterson et al. (2011) hanno trovato TTS uditivi maggiori dopo l'esposizione al solo rumore e dopo l'esposizione combinata a 4 kHz e 8 kHz (i valori di TTS diminuivano nel tempo di recupero) e nessun effetto nella condizione di sola vibrazione. Tuttavia, le differenze tra l'esposizione simultanea a rumore e HAV e l'esposizione a solo rumore non erano significative. Gli autori hanno suggerito che gli effetti dell'esposizione combinata potrebbero essere dovuti al rumore aggiuntivo dello strumento vibrante. Il rumore a banda larga aggiunto nella condizione sperimentale potrebbe non essere in grado di riprodurre lo spettro del rumore degli strumenti vibranti in condizioni di lavoro reali. Infine, hanno sottolineato che questi risultati non possono essere generalizzati a soggetti anziani e non sani esposti nel posto di lavoro, perché il

campione analizzato è costituito da soggetti giovani sani senza storia di esposizione professionale. Hanno anche escluso ogni influenza di genere sui loro risultati.

In Seidel et al. (1988) sono stati analizzati gli effetti su udito e vista derivanti dall'esposizione isolata e simultanea al rumore e WBV. Sei soggetti sani (età [18, 36]) sono stati esposti al solo rumore (92 dBA) prodotto da altoparlanti ad una distanza di 1 m dall'orecchio del soggetto, al solo WBV lungo l'asse Z (4 Hz e 1.0 m/s², dispositivo vibrante con emissione di rumore acustico a 65 dBA), e simultaneamente a rumore e WBV. Ogni condizione sperimentale è stata divisa in 3 sessioni di esposizione da 30 minuti (ossia la durata complessiva di esposizione era di 90 minuti) con 30 minuti di pausa, durante le quali sono state effettuate misure di TTS uditivi e altri tests. Gli autori hanno trovato differenze significative tra i TTS alle alte frequenze, nell'intervallo 4 - 12 kHz, osservati nella condizione in cui i soggetti sono stati esposti contemporaneamente alle vibrazioni del corpo intero e al rumore rispetto alla condizione di esposizione di solo rumore (vedi tabella I in Seidel et al. (1988)). In particolare, hanno osservato che la presenza simultanea di rumore e vibrazioni al corpo intero aumenta l'effetto del rumore nell'indurre i TTS. Gli autori hanno anche suggerito le possibili spiegazioni dei fenomeni osservati. Oltre all'effetto meccanico sull'orecchio interno a causa dell'esposizione alle vibrazioni, è stata ipotizzata una reazione dei muscoli dell'orecchio medio che potrebbe causare cambiamenti ritmici dell'impedenza, inducendo così ulteriori possibili danni all'orecchio interno.

Sono possibili alcune osservazioni. Mentre la relazione tra WBV e TTS è piuttosto forte, quella con l'HAV è debole. Pertanto la meccanica di trasmissione della MV deve essere studiata in modo più approfondito. Funzionale a questo studio è la valutazione delle differenze tra corporatura diversa e forza di contatto (accoppiamento sorgente-soggetto). Alcuni meccanismi dell'effetto sinergico sono suggeriti dagli autori citati. Al fine di verificare quello effettivo è necessaria una maggiore riproducibilità di entrambi i segnali di MV, WBV e HAV, oltre ad una migliore definizione dell'analisi della performance dell'orecchio interno prima e dopo l'esposizione al rumore e alle vibrazioni.

È necessaria una valutazione dotata di migliore definizione in frequenza del danno transitorio all'orecchio interno per seguire gli effetti delle diverse frequenze di MV.

5 - ALTRI EFFETTI DOVUTI ALL'ESPOSIZIONE COMBINATA A RUMORE E VIBRAZIONI

Altri effetti del rumore e delle vibrazioni sugli organi o tessuti umani o animali sono stati esplorati dai ricercatori.

Vale la pena ricordare alcuni di questi lavori.

Axelsson e Dengerink (1987) hanno accuratamente studiato gli effetti dell'esposizione al rumore sul sistema vascolare cocleare e sui globuli rossi attraverso l'esame istologico. Hanno sottolineato che il rumore ha avuto un notevole effetto negativo sulla circolazione cocleare e sulla sua vascolarizzazione. In particolare, il rumore impulsivo è risultato più efficace sulla modificazione vascolare rispetto ad un rumore continuo.

Negli stessi anni anche Thorne e Nuttall (1987) hanno sviluppato uno studio sulle dinamiche vascolari della coclea mediante una misura con un laser doppler del flusso di sangue cocleare su porcellini d'india esposti ad un forte suono a diverse frequenze e intensità. Anche in questo caso, i risultati hanno mostrato una piccola ma significativa modifica nella circolazione sanguigna cocleare, cioè una diminuzione, dopo un'esposizione ad un alto livello di rumore. All'epoca, non è stata formulata nessuna ragionevole ipotesi sul rapporto tra il cambiamento del flusso sanguigno e il danno cocleare.

Starck et al. (1988) hanno studiato gli effetti del rumore impulsivo e dell'esposizione simultanea a rumore e vibrazioni sulla perdita uditiva di tipo neurosensoriale (SNHL, *Sensori Neural Hearing Loss*). Questo studio è stato condotto su un campione di lavoratori forestali e di cantiere. A livello statisticamente significativo hanno concluso che il rumore impulsivo aumenta il verificarsi di SNHL rispetto alle vibrazioni mano-braccio e al rumore continuo.

Harada et al. (1992) hanno studiato gli effetti delle fonti di stress come il rumore, le vibrazioni e l'esposizione a freddo sui lavoratori esposti a strumenti vibranti. La fisiopatologia della sindrome da vibrazioni mano-braccio è messa in relazione a questi fattori di rischio studiando il loro effetto sul sistema nervoso autonomo.

Un campione di quattro soggetti sani sono stati esposti a differenti combinazioni di rumore e rumore più vibrazioni in due condizioni di temperatura (13°C e 25°C). E' stata somministrata una vibrazione mano-braccio destra con 40 m/s^2 a 63 Hz con un carico statico complementare di 40 N. Il livello di rumore bianco era a 96 dB (A) e la durata di ciascuna esposizione era di 10 minuti.

I parametri fisiologici monitorati sono stati: frequenza cardiaca, pressione sanguigna del braccio e temperatura della pelle delle dita.

È stata effettuata un'analisi additiva di catecolamine plasmatiche.

I risultati dopo il periodo di esposizione sono stati: nel corso di ogni prova, la temperatura del dito destro è diminuita, mentre la pressione sanguigna e la frequenza cardiaca aumentata. Il livello nel plasma sanguigno di noradrenalina, un indicatore sensibile dell'attività simpatica, è aumentato. Quest'ultimo fenomeno è stato più evidente dopo l'esposizione combinata di rumore e vibrazioni. L'esposizione al solo freddo ha causato un aumento del livello di norepinefrina di circa 120%.

Le conclusioni sono state che l'esposizione del sistema mano-braccio a vibrazioni ha avuto l'effetto di attivazione del sistema nervoso simpatico.

L'esposizione al solo rumore non ha indotto direttamente questa attivazione, ma ha contribuito con un effetto sinergico.

Infine, l'esposizione al freddo ha aggiunto solo un termine additivo all'effetto.

Tutti questi risultati possono aiutare a interpretare la risposta particolare del sistema nervoso simpatico osservato nella sindrome da vibrazioni mano-braccio per l'effetto combinato di esposizione al rumore, vibrazioni e freddo.

Infine, è importante sottolineare il lavoro di Castelo Branco (1999), che ha effettuato un'accurata analisi epidemiologica statistica sulla malattia vibroacustica (VAD, *Vibro Acoustic Disease*) attraverso una revisione accurata dei risultati clinici e dei referti medici di un grande set di dati di casi di pazienti.

6 - PUNTI DI FORZA E PUNTI DEBOLI DEI PRINCIPALI STUDI EFFETTUATI

Secondo la letteratura, l'esposizione combinata al rumore e alle vibrazioni sembra accrescere sinergicamente l'effetto dell'esposizione al solo rumore. Questo effetto sinergico sembra essere più evidente alle alte frequenze audiometriche come 4, 6, 8 kHz. Per questo motivo gli studi futuri devono effettuare un'analisi accurata in particolare in queste bande di frequenza.

Inoltre, sessioni di misura ripetute sembrano essere un punto sperimentale fondamentale per ottenere effetti significativi da esposizione (particolarmente evidenziato da Zhu et al. (1997) e Seidel et al. (1988)).

Infine, come sottolineato da Manninen (1985, 1986), la misura delle variazioni di HR, l'ampiezza dell'onda R, la pressione diastolica, la pressione sanguigna sistolica, la pressione del polso e il tempo di recupero dopo l'esposizione al rumore e vibrazioni, rappresentano test additivi per valutare gli effetti fisiologici dell'esposizione.

Anche se i risultati degli studi condotti finora sono incoraggianti, i dati sono ancora insufficienti, e vi è ancora una mancanza di conoscenza per quanto riguarda gli effetti dell'esposizione simultanea di rumore e vibrazioni. Dal punto di vista metodologico, questi studi sono influenzati anche dalla mancanza di riproducibilità. In particolare, in tutti i lavori riguardanti gli effetti sugli esseri umani di rumore e vibrazioni che abbiamo fino ad ora esaminato, i danni cocleari sono stati valutati misurando i TTS con audiometria standard, che è una tecnica di misura soggettiva, scarsamente definita in frequenza (bande di frequenza larghe). Solo in alcuni studi è stata effettuata anche una timpanometria standard per valutare eventuali indebolimenti nella trasmissione dell'orecchio medio.

Inoltre, in molti studi l'esposizione alle vibrazioni non era multifrequenziale. Poiché il corpo umano è caratterizzato da una funzione di trasferimento che ha risonanze specifiche, la propagazione di differenti frequenze è definitivamente non-lineare. Questo indica come necessario esplorare un più ampio spettro di frequenza vibratoria per poter valutare gli effetti alle bande di frequenza di interesse. Inoltre, durante l'esposizione alle vibrazioni, non venivano misurate le forze di accoppiamento e la posizione, mentre è risaputo che queste influenzano l'assorbimento e la propagazione delle vibrazioni, soprattutto nel sistema mano-braccio.

Tutte queste ragioni suggeriscono la necessità di una valutazione quantitativa rigorosa dell'effetto dell'interazione tra rumore e vibrazioni e un miglioramento delle tecniche di esposizione.

Le emissioni otoacustiche (OAEs, *Oto Acoustic Emissions*) potrebbero essere utilizzate come biomarcatori per gli effetti sulla funzionalità cocleare in quanto variabili oggettive a differenza della tecnica soggettiva del TTS uditivo. Nessuno ha suggerito uno studio accurato della funzionalità cocleare umana basato sulle OAEs (solo Moussavi-Najarala et al. (2012, 2012a) che ha utilizzato DPOAEs al fine di valutare gli effetti dell'esposizione a WBV sui conigli).

7 - LE OAEs COME BIOMARCATORI DELLA FUNZIONALITÀ COCLEARE

Attualmente, le OAEs sono i biomarcatori più sensibili degli effetti precoci della funzionalità cocleare.

Le OAEs sono suoni spontanei o evocati generati dall'orecchio interno come epifenomeno dell'attività di amplificazione cocleare. Viaggiano all'indietro verso il canale uditivo, e giungono nell'orecchio esterno dove possono essere registrate.

I test basati sulle OAEs presentano diversi vantaggi che li suggeriscono come biomarcatori di effetti precoci del danno cocleare. In particolare, ai fini di questo studio, sarebbe consigliabile usare i TEOAEs (*Transient Evoked OAEs*) e i DPOAEs (*Distortion Product OAEs*), opportunamente analizzati nello spazio tempo-frequenza. Le OAEs spontanee sincronizzate potrebbero essere, in linea di principio, buone candidate ad essere le più sensibili tra le OAEs degli effetti precoci sulla funzionalità cocleare. Tuttavia, sarebbe preferibile escluderle per la loro elevata variabilità durante una sessione di misurazione giornaliera dei singoli soggetti.

Le OAEs sono originate nell'orecchio interno da due meccanismi (Shera e Guinan, 1999): la riflessione coerente lineare e la distorsione non lineare.

Nel meccanismo di *riflessione lineare* l'onda viaggiante sulla membrana basale (BM, *Basilar Membrane*) viene riflessa da irregolarità micromeccaniche (rugosità) distribuite lungo la BM. Un contributo significativo viene solo dalla regione vicino al sito tonotopico di risonanza corrispondente alla frequenza dello stimolo. Questo meccanismo è identificato come posizione-definita, perché per piccole variazioni della frequenza dello stimolo la regione significativa non cambia. Come risultato, la fase di una OAE generata da tale meccanismo è una funzione che decresce rapidamente con la frequenza.

Nel meccanismo di *distorsione non lineare* entra in gioco la non linearità cubica della risposta cocleare. Per uno stimolo multi-frequenza, la non linearità di risposta della BM genera un'onda contenente una combinazione lineare delle frequenze dello stimolo. Come risultato, questo meccanismo è identificato come onda-definita perché il sito di generazione dipende dalla frequenza dello stimolo. Così la fase delle OAEs prodotte da tale meccanismo è una funzione costante della frequenza in una coclea invariante in scala (con deviazioni a bassa frequenza).

Le OAEs sono in linea di principio la somma vettoriale delle componenti generate dai due meccanismi sopra discussi secondo il livello di stimolo. Questo genera la ben nota struttura fine nelle ampiezze spettrali delle OAEs. Il primo meccanismo prevale ad un basso livello di stimolo, mentre il secondo prevale a livelli più alti.

In particolare, nel caso dei DPOAEs lo stimolo è costituito da due differenti toni sinusoidali. Allora una sovrapposizione delle onde viaggianti, corrispondenti alle due frequenze di stimolo (f_1 e $f_2 = rf_1$ con $r > 1$, in modo che $f_1 < f_2$), avviene nel sito risonante a frequenza f_2 , generando un'onda di distorsione contenente frequenze che sono combinazioni lineari di f_1 e f_2 . Quest'onda viaggia sia all'indietro verso la base cocleare, generando la componente DP a breve latenza (SL, *Zero Latency*), sia verso il corrispondente sito di risonanza. Quest'ultima onda è nota come DP Intracocleare (IDP, *Intracochlear Distortion Product*) e viene riflessa indietro come componente DP a lunga latenza (LL, *Long Latency*). La componente DP a lunga latenza può essere considerata come una *Stimulus Frequency OAE* (SFOAE) evocata da uno

stimolo intracocleare). Le componenti ZL e LL si sommano vettorialmente per generare i DPOAEs registrati nel canale uditivo. I DPOAEs più interessanti sono alla frequenza $2f_1 - f_2$ poiché hanno intensità maggiore.

Le due componenti ZL e LL sono caratterizzate da differenti ritardi del gradiente di fase, cosicché possono essere efficacemente separate da un filtraggio nel dominio tempo-frequenza.

Un nuovo metodo di filtraggio tempo-frequenza basato sulle trasformate wavelet (Moleti et al. 2012, Moleti et al. 2012a, Sisto et al. 2013) può essere utilizzato per separare le componenti di DPOAE in base al loro differente ritardo del gradiente di fase. Quest'ultimo varia in base alla potenza di latenza spettrale $\tau = a (f / \text{kHz})^{-b}$, con f in kHz, a (ms) e b costanti caratteristiche di ciascun soggetto. In Figura 1 è riportato come esempio uno spettro tempo-frequenza dei coefficienti wavelet di un DPOAE ($2f_1 - f_2$) misurato su un soggetto umano. Tre regioni principali possono essere identificate in base al loro diverso comportamento di fase e tramite le linee di cut-off, descritte dalla legge di potenza $\tau = A_i (f / \text{kHz})^{-b}$ (in figura 1 b è 0.7). Tale filtro tempo-frequenza separa le tre regioni traducendo adeguatamente la legge di potenza mediante diverse costanti A_i . In questo modo potrebbero essere ottenute ZL, LL e le riflessioni multiple.

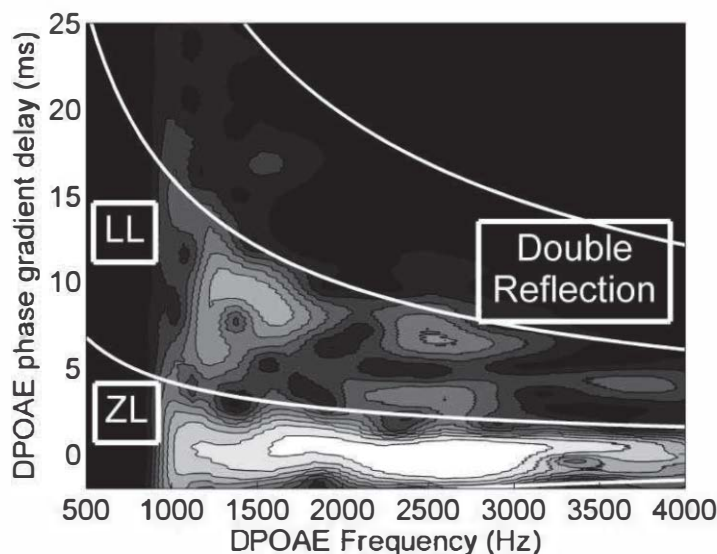


Figura 1; Coefficienti wavelet nel dominio tempo-frequenza di un DPOAE ($2f_1 - f_2$) misurato su soggetto umano normo-udente nel range di frequenza $2f_1 - f_2$ di 1-4 kHz. Le frequenze di stimolo f_1 e f_2 sono state scelte con $f_2 / f_1 = 1.22$, e ampiezza di 61 dB SPL per f_1 e 55 dB SPL per f_2 .

Questa tecnica innovativa permette di utilizzare le componenti del DPOAE di natura onda-definita e posizione-definita (Shaffer e Dhar 2006, Abdala e Dhar 2012, Shaffer et al., 2003, Long e Talmadge 2008) come variabili di uscita multivariate per valutare le modifiche della funzionalità cocleare dopo l'esposizione ad agenti di rischio, quali rumore e vibrazioni. Come ipotesi principale le diverse componenti di

OAEs dovrebbero essere influenzate in maniera diversa dall'esposizione agli agenti di rischio. Questo metodo è già stato utilizzato con successo per valutare gli effetti uditivi di esposizione ai campi elettromagnetici (Parazzini et al. 2005, Paglialonga et al. 2007). Inoltre, la separazione delle componenti ZL e LL di ritardo breve e lungo è stata utilizzata da Sisto et al. (2013a) per individuare i migliori candidati come biomarcatori degli effetti cocleari precoci indotti da esposizione a stirene. Infine, la separazione dei componenti di DPOAE è stata introdotta in campo clinico su neonati (Abdala e Dhar 2010).

Questi studi suggeriscono di impiegare i DPOAEs e le TEOAEs come test di valutazione funzionale della coclea, oltre all'audiometria e alla timpanometria utilizzate come metodi di riferimento. Pertanto le ampiezze spettrali delle componenti separate onda-definita e posizione-definita delle OAE potrebbero essere utilizzate come variabili di uscita multivariate per valutare la funzionalità cocleare prima e dopo l'esposizione al rumore, alle vibrazioni o ad entrambi. Di conseguenza, la scelta delle OAEs come biomarcatori idonei alla valutazione degli effetti precoci dell'esposizione suggerisce di preferire soggetti giovani normoacustici (età media 20-50 anni), poiché le OAEs in questa popolazione sono decisamente più intense.

8 - ESPOSIZIONE A VIBRAZIONE MECCANICA

La letteratura sottolinea la necessità di estendere l'esposizione a MV alle basse frequenze. Come è stato detto da alcuni autori (Yokoyama et al. (1974), Adewusi et al. (2007), Fattorini et al. 2007) ci sono alcune risonanze meccaniche del corpo umano che devono essere esplorate. Alcune di queste risonanze sono determinate dal comportamento del muscolo come attuatore - assorbitore attivo (Marchetti et al. 2014, Fattorini et al. 2014, Xu et al. 2014). Pertanto si dovrà studiare il comportamento dei principali gruppi muscolari lungo il percorso di propagazione delle vibrazioni e la frequenza più bassa indagata dovrà essere inferiore a 5 Hz. Altre risonanze sono dipendenti dalla struttura meccanica del sistema mano-braccio come corpo rigido e/o ammortizzato. Altrettanto è vero per il corpo intero. Pertanto, nell'intento di stabilire una correlazione tra causa ed effetto sinergico delle vibrazioni sulla funzionalità cocleare, risulta essenziale seguire la trasmissione delle vibrazioni dal punto di ingresso nel corpo alla coclea (dai piedi per le WBV e dalla mano per le HAV). Fare questo con metodi non invasivi implica una accelerometria accurata e distribuita sui diversi segmenti del corpo interessati dalle vibrazioni meccaniche. La misura delle forze in fase con le vibrazioni rende inoltre possibile valutare la potenza assorbita nei vari distretti corporei.

La fattibilità delle misure qui esposte richiede alcuni prerequisiti. La riproducibilità delle MV è essenziale per la valutazione di una relazione dose-risposta. Questo comporta la disponibilità di uno *shaker* (per HAV) e di una tavola vibrante (per WBV) con caratteristiche lineari specifiche e riproducibilità definita dall'utente. La stimolazione HAV deve raggiungere 30 m/s^2 r.m.s. (secondo UNI EN ISO 5349: 1) con bande di frequenza in terzi di ottava da 4 a 1250 Hz. Mentre l'esposizione a vibrazioni al corpo intero ha bisogno di una piattaforma vibrante che possa raggiungere un livello di accelerazione ponderata di 1 m/s^2 (secondo UNI EN ISO 2631: 1). La riproducibilità deve essere determinata da coloro che eseguono i test in

modo da rendere il relativo errore inferiore alla dispersione dei dati determinata dall'incertezza sulle altre grandezze misurate.

Poiché la postura e la forza di prensione sono fondamentali nel modulare l'esposizione mano-braccio (Burström L., 1997, Marchetti et al. 2007), e la forza è uno dei componenti fondamentali della potenza assorbita, è necessario adottare una standardizzazione rigorosa per la misura ed il confronto dell'esposizione individuale. La forza dovrà essere espressa come percentuale della contrazione massima individuale (MVC, *Maximum Voluntary Contraction*). Questo servirà come riferimento per la forza muscolare individuale esercitata e consentirà di fare un confronto diretto tra soggetti diversi (Marchetti et al. 2007).

La riduzione dell'incertezza delle misure sulla trasmissione delle vibrazioni meccaniche richiede un'accelerometria che non induca un errore dovuto alla massa dell'accelerometro. Pertanto si adotterà un'accelerometria laser Doppler.

Infine, durante l'esposizione a vibrazioni, la risposta neuro-muscolare allo stimolo vibrante sarà valutata eseguendo una elettromiografia di superficie (sEMG, *surface ElectroMyoGraphy*). Le forze di accoppiamento e la postura del soggetto devono essere monitorati durante l'intera sessione di esposizione per garantirne la ragionevole costanza durante le misure.

9 - CONCLUSIONI

Lo studio dell'interazione di rumore e vibrazioni sugli effetti nell'udito nell'uomo deve acquisire alcuni ulteriori elementi di conoscenza.

La precedente analisi della letteratura evidenzia che il meccanismo di interazione nell'esposizione a rumore e vibrazione non è ben definito. La conoscenza della relazione dose-risposta è di fondamentale importanza per la definizione dei livelli quantitativi di esposizione, affinché la sinergia tra rumore e vibrazioni possa svolgere un ruolo quantitativo nella valutazione del danno dell'orecchio interno.

Per raggiungere questo obiettivo, alcune tecniche di misura devono essere implementate e aggiornate: acquisizione di forze di contatto, trasmissione della MV dal punto di ingresso nel corpo all'orecchio, migliore definizione della risposta dell'orecchio. Per una migliore comprensione del modello di trasmissione, date le risonanze presenti nella trasmissione dell'energia meccanica, è necessaria un'elettromiografia di superficie per determinare la modulazione muscolare di detta trasmissione delle MV.

Tutte le informazioni possono essere integrate in un modello biodinamico del corpo umano.

Secondo la letteratura, l'esposizione combinata al rumore e alle vibrazioni sembra accrescere sinergicamente l'effetto dell'esposizione al solo rumore. Questo effetto sinergico sembra essere più evidente alle alte frequenze audiometriche come 4, 6, 8 kHz. Per valutare più accuratamente gli effetti primari sulla funzionalità cocleare, sarebbe consigliabile effettuare nuovi e più potenti test uditivi basati sulle misure delle OAEs come quella basata sulla separazione delle componenti onda-definita e il luogo-definito delle DPOAEs.

10 – BIBLIOGRAFIA

1. Abdala C., Dhar S. (2010). "Distortion product otoacoustic emission phase and component analysis in human newborns," *J. Acoust. Soc. Am.* **127**(1), 316-325.
2. Abdala C., Dhar S. (2012), "Maturation and Aging of the Human Cochlea: A View through the DPOAE Looking Glass," *J. Assoc. Res. Otolaryng* **13**(1).
3. Adewusi S., Rakheja S., Boileau P.E., Marcotte P., Boutin J., (2007) "On the resonant frequencies of the human hand-arm system", *Acts of 11th International Conference on Hand-Arm Vibration*, Bologna, Italy, 341-348.
4. Axelsson A., Dengerink H. (1987). "The effects of noise on histological measures of the cochlear vasculature and red blood cells: a review," *Hearing Research* **31**, 183-192.
5. Bochnia M., Morgenroth K., Dziewiszek W., Kassner J. (2005). "Experimental vibratory damage of the inner ear," *Eur. Arch. Otorhinolaryngol* **262**, 307-313.
6. L. Burström, (1997) "The influence of biodynamic factors on the mechanical impedance of the hand and arm", *Int. Archives of Occupational Environmental Health* **69**, 437-446.
7. Castelo Branco N. A. A. (1999). "The clinical stages of Vibroacoustic Disease," *Aviation, Space, and Environ. Medicine* **70**(3), Section II, A32-A39.
8. Fattorini L., Morgia F., Gimenez V., Valero J., Delussu A.S., Filligoi G., Draicchio F., Marchetti E., (2007), "Hand-arm resonance frequency and related neuromuscular activation", *Acts of 11th International Conference on Hand-Arm Vibration*, Bologna, Italy, 407-414.
9. Fattorini L., Tirabasso A., Sacco F., Lunghi A., Di Giovanni R., Rodio A., Marchetti E., (2014), "Influence of the mechanical vibration on fatiguing hand-grip tasks", *Acts of the XX ISEK Conference*, Roma, Italy, p. 89
10. Fernandes M., Morata T.C. (2002). "Auditory and extra-auditory effects of occupational exposure to noise and vibration," *Rev. Bras. Otorrinolaringol* **68**(5), 705-713.
11. Harada N., Iwamoto M., Hirokawa I., Ishii F., Yoneda J., Morie T., Nakamoto M. (1992). "Combined effect of noise, vibration and cold exposure on the Autonomic Nervous System", In: Dupuis H., Christ E., Sandover DJ. Taylor W., Okada A., eds. *Proceedings of the 6th International Conference on Hand-Arm Vibration*. Sankt Augustin, FRG, BIA, 465-473.
12. House R. A., Sauvé J.T., Jiang D. (2010). "Noise-induced Hearing Loss in Construction Workers Being Assessed for Hand-arm Vibration Syndrome," *Can. J. Public Health* **101**(3), 226-229.
13. Iki M., Kurumatani N., Hirata K., Moriya-ma T., Satoh M., Arai T. (1986). "Association between vibration-induced white finger and hearing loss in forestry workers," *Scand. J. Work Environ. Health* **12**(4), 365-370.

14. Long G. R., Talmadge C. L. (2008). "Using the frequency dispersive properties of otoacoustic emissions to facilitate separation of different components," *J. Acoust. Soc. Am.* **123**(5), 3853.
15. Manninen O. (1983). "Studies of Combined Effects of Sinusoidal Whole Body Vibrations and Noise of Varying Bandwidths and Intensities on TTS₂ in Men," *Int. Arch. Occup. Environ. Health* **51**, 273-288.
16. Manninen O. (1984). "Hearing threshold and heart rate in men after repeated exposure to dynamic muscle work, sinusoidal vs stochastic whole body vibration and stable broadband noise," *Int. Arch. Occup. Environ. Health* **54**, 19-32.
17. Manninen O. (1985). "Cardiovascular changes and hearing threshold shifts in men under complex exposures to noise, whole body vibrations, temperatures and competition-type psychic load," *Int. Arch. Occup. Environ. Health* **56**, 251-274.
18. Manninen O. (1986). "Bioresponses in men after repeated exposures to single and simultaneous sinusoidal or stochastic whole body vibrations of varying bandwidths and noise," *Int. Arch. Occup. Environ. Health* **57**, 267-295.
19. Marchetti E., Lunghi A., Fattorini L., Nataletti P., Morgia F., (2007) "difference between men and women In hand-transmitted vibration power absorption" *Acts of 11th International Conference on Hand-Arm Vibration*, Bologna, Italy, 383-390.
20. Marchetti E., Tirabasso A., Sacco F., Lunghi A., Di Giovanni R., Gizzi L., Fattorini L., (2014), "Neuromuscular influence of the mechanical vibration during hand-grip tasks", *Acts of the XX ISEK Conference*, Roma, Italy, p. 88.
21. Miyakita T., Miura H., Futatsuka M. (1987). "Noise-induced hearing loss in relation to vibration-induced white finger in chain-saw workers," *Scand. J. Work Environ. Health* **13**, 32-36.
22. Miyakita T., Miura H., Futatsuka M. (1987a). "An experimental study of the physiological effects of chain saw operation," *British Journal of Industrial Medicine* **44**, 41-46.
23. Moleti A., Longo F., Sisto R. (2012). "Time-frequency domain filtering of evoked otoacoustic emissions," *J. Acoust. Soc. Am.* **132**(4), 2455-2467.
24. Moleti A., Sisto R., Sanjust F. (2012a). "Le emissioni otoacustiche come test delle proprietà nonlineari dell'amplificatore cocleare," *Riv. It. Acustica* **36**(2), 19-25.
25. Moussavi-Najarkola S. A., Khavanin A., Mirzaei R., Salehnia M., Akbari M. (2012). "Effects of whole body vibration on outer hair cells' hearing response to distortion product otoacoustic emissions," *Vitro Cell. Dev. Biol.-Animal* **48**, 276-283.
26. Moussavi-Najarkola S. A., Khavanin A., Mirzaei R., Salehnia M., Akbari M. (2012a). "Assessment of the influence of whole body vibration on Cochlear function," *Journal of Occupational Medicine and Toxicology* **7**:12.

27. Okada A., Miyake H., Yamamura K., Minami M. (1972). "Temporary hearing loss induced by noise and vibration," *The Journal of the Acoustical Society of America* **51**(4), 1240-1248.
28. Paglialonga A., Tognola G., Parazzini M., Lutman E. M., Bell S. L., Thuroczy G., Ravazzani P. (2007). "Effects of mobile phone exposure on time frequency fine structure of transiently evoked otoacoustic emissions," *J. Acoust. Soc. Am.* **122**(4), 2174-2182.
29. Palmer K. T., Griffin M. J., Syddall H. E., Pannett B., Cooper C., Coggon D. (2002). "Raynaud's phenomenon, vibration induced white finger, and difficulties in hearing," *Occup. Environ. Med.* **59**, 640-642.
30. Parazzini M., Bell S., Thuroczy G., Moluar F., Tognola G., Lutman M. E., Ravazzani P. (2005). "Influence on the mechanism of generation of distortion product otoacoustic emission of mobile phone exposure," *Hearing Research* **208**(1-2), 68-78.
31. Pettersson H., Burström L., Nilsson T. (2011). "The effect on the temporary threshold shift in hearing acuity from combined exposure to authentic noise and hand-arm vibration," *Int. Arch. Occup. Environ. Health* **84**, 951-957.
32. Pettersson H., Burström L., Hagberg M., Lundström R., Nilsson T. (2012). "Noise and hand-arm vibration exposure in relation to the risk of hearing loss," *Noise and Health* **14**(59), 159-165.
33. Pyykkö I., Farkkila M., Toivanen J., Korhonen O., Hyvarinen J. (1975), "Transmission of vibration in the hand-arm system with special reference to changes in compression force and acceleration", *Scand. J. Work Environ. & Health*, 2: 87-95.
34. Pyykkö I., Starck J., Färkkilä M., Hoikkala M., O. Korhonen, Nurminen M. (1981). "Hand-arm vibration in the aetiology of hearing loss in lumberjacks," *British Journal of Industrial Medicine* **38**, 281-289.
35. Pyykkö I., Starck J., Pekkarinen J. (1986). "Further evidence of a relation between noise-induced permanent threshold shift and vibration-induced digital vasospasms," *Am. J. Otolaryngol.* **4**, 391-398.
36. Pyykkö I., Färkkilä M., Inaba R., Starck J., Pekkarinen J. (1994). "Effect of hand-arm vibration on inner ear and cardiac functions in man," *Nagoya J. Med. Sci.* **57** (Suppl), 113-119.
37. Seidel H., Harazin B., Pavlas K., Sroka C., Richter J., Blüthner R., Erdmann U., Grzesik J., Hinz B., Rothe R. (1988). "Isolated and combined effects of prolonged exposures to noise and whole-body vibration on hearing, vision and strain," *Int. Arch. Occup. Environ. Health* **61**, 95-106.
38. Shaffer L. A., Withnell R. H., Dhar S., Lilly D. J., Goodman S. S., Harmon K. M. (2003). "Sources and Mechanisms of DPOAE Generation: Implications for the Prediction of Auditory Sensitivity," *Ear & Hearing* **24**(5), 367-379.
39. Shaffer L. A., Dhar S. (2006). "DPOAE Component Estimates and Their Relationship to Hearing Thresholds," *J. Am. Acad. Audiol.* **17**(4), 279-292.
40. Shera C. A., Guinan J. J. Jr. (1999). "Evoked otoacoustic emissions arise by two fundamentally different mechanisms: A taxonomy for mammalian OAEs," *J. Acoust. Soc. Am.* **105**(2), 782-798.

41. Silva L.F., Mendes R., (2005). "Combined exposure to noise and vibration and its effects on worker's hearing", *Rev. Saúde Pública.* **39**(1), 9-17.
42. Sisto R., Moleti A., Sanjust F. (2013). "Input/output functions of different-latency components of transient-evoked and stimulus-frequency otoacoustic emissions," *J. Acoust. Soc. Am.* **133**(4), 2240-2253.
43. Sisto R., Cerini L., Gatto M. P., Gherardi M., Gordiani A., Sanjust F., Paci E., Tranfo G., Moleti A. (2013a). "Otoacoustic emission sensitivity to exposure to styrene and noise," *J. Acoust. Soc. Am.* **134**(5), 3739-3748.
44. Starck J., Pekkarinen J., Pyykkö I. (1988). "Impulse noise and hand-arm vibration in relation to sensory neural hearing loss," *Scand. J. Work. Environ. Health* **14**, 265-271.
45. Sutinen P., Zou J., Hunter L. L., Toppila E., Pyykkö I. (2007). "Vibration-Induced Hearing Loss: Mechanical and Physiological Aspects," *Otology & Neurotology* **28**, 171-177.
46. Thorne P. R., Nuttall A.L. (1987). "Laser Doppler measurements of cochlear blood flow during loud sound exposure in the guinea pig," *Hearing Research* **27**, 1-10.
47. Xu L., Rabotti C., Mischi M., (2014), "On the EMG signal recorded during vibration exercise", *Acts of the XX ISEK Conference, Roma, Italy*, p. 105.
48. Yokoyama T., Osako S., Yamamoto K. (1974). "Temporary threshold shifts produced by exposure to vibration, noise, and vibration-plus-noise," *Acta Otolaryng.* **78**, 207-212.
49. Zhu S., Sakakibara S., Yamada S. (1997). "Combined effects of hand-arm vibration and noise on temporary threshold shifts of hearing in healthy subjects," *Int. Arch. Occup. Environ. Health* **69**, 433-436.
50. Zou J., Bretlau P., Pyykkö I., Starck J., Toppila E. (2001). "Sensorineural Hearing Loss after Vibration: an Animal Model for Evaluating Prevention and Treatment of Inner Ear Hearing Loss," *Acta Otolaryngol* **121**, 143-148.

**FACTORYMOTE:
IL SISTEMA PER IL MONITORAGGIO DELL'AMBIENTE DI LAVORO**

Alberto Artioli, Alberto Cocheo, Elisa Quattrini

Engim srl - Modena

1 - PREMESSA

*«Ciò che non si può misurare,
non si può migliorare».
Lord Kelvin*

Per ogni azienda è fondamentale monitorare la sicurezza dei processi produttivi e la loro incidenza sull'ambiente di lavoro per due ragioni principali:

- Migliorare la sicurezza delle attività sui macchinari e tutelare il lavoratore dai rischi di esposizione da agenti fisici.
Ai fini del D.Lgs. n.81/2008, come agenti fisici si intendono il rumore, gli ultrasuoni, gli infrasuoni, le vibrazioni meccaniche, i campi elettromagnetici, le radiazioni ottiche di origine artificiale, il microclima e le atmosfere iperbariche, che possono comportare rischi per la sicurezza e la salute dei lavoratori.
In caso di esposizione eccessiva da questi agenti è fondamentale agire tempestivamente per individuarne le cause e adottare adeguate misure che permettano di riportare l'esposizione al di sotto dei valori limite e che evitino il ripresentarsi di questa situazione. Può inoltre diventare necessario modificare alcune scelte effettuate sui processi produttivi.
- Analizzare qualità e performance del processo produttivo per rendere sempre più competitiva la propria realtà, eliminando errori dovuti a gestioni inefficaci.
Per migliorare e ottimizzare i processi produttivi è infatti indispensabile avere informazioni in tempo reale sui macchinari di produzione e sull'ambiente di lavoro.

Per monitorare e migliorare la sicurezza e le performance del processo produttivo, lo stabilimento deve essere provvisto di strumenti affidabili e real-time idonei a tenere sotto controllo gli impianti, le operazioni eseguite in linea e la sicurezza degli operatori.

FactoryMote nasce per rispondere a queste esigenze aziendali. È una soluzione sviluppata per monitorare e gestire al meglio l'intero ciclo produttivo, grazie alla sua capacità di fornire dati in tempo reale sui macchinari di produzione sui quali viene applicato e sull'ambiente di lavoro circostante.

Grazie a questo sistema l'utente, tramite apposita interfaccia web, può monitorare costantemente la sicurezza e la qualità dell'ambiente di lavoro. Un'attenta analisi dei dati raccolti nel tempo dal sistema permette inoltre di valutare, misurare e prevenire i rischi e di migliorare produttività, sicurezza e gestione degli stabilimenti, anche grazie ad analisi che possono essere effettuate a posteriori.

Composto da hardware e software perfettamente integrati tra loro, FactoryMote può essere collocato non solo sul singolo macchinario, ma anche all'interno di un reparto di lavoro per rilevare specifici dati presenti nel locale. Ad esempio viene spesso installato nelle sale metrologiche per tenere monitorati parametri quali rumore, vibrazioni, luminosità, consumi elettrici, temperature/umidità, ecc. Anche le aree particolarmente rumorose, come le sale compressori, possono trarre particolari vantaggi dal punto di vista della sicurezza. FactoryMote permette ad esempio di segnalare tramite un alert la presenza di un operatore in un locale particolarmente rumoroso. Il RSPP viene così informato e, se lo ritiene necessario, può recarsi sul luogo per controllare il corretto utilizzo dei DPI. In caso di Certificazione ambientale ISO 14000, inoltre, può essere rilevante monitorare il rumore e i consumi energetici non solo all'interno di una specifica area, ma anche al suo esterno. Per esempio, grazie ad un sensore fonometrico posizionato all'esterno della sala compressori, è possibile raccogliere dati per capire l'incidenza del rumore ambientale anche al di fuori dell'area di specifico interesse.

Può essere inoltre interessante installare FactoryMote su attrezzature con elettronica datata per monitorare parametri che normalmente non sarebbe possibile recuperare.

2 – FACTORYMOTE: L'HARDWARE

La parte hardware di FactoryMote è costituita da microcomputer che vengono installati direttamente sulle macchine dedicate alla produzione. Si tratta di schede di acquisizione, "moduli plug and play" che, collegati ai macchinari, permettono di rilevare dati dall'ambiente di lavoro attraverso dei sensori.

L'idea originale venne a un professore di informatica presso l'Università di Calgary che si occupava di interfacce uomo-computer. La sua ricerca era orientata alla progettazione e realizzazione di interfacce informatiche che interagivano con il mondo fisico. Per esempio realizzò un sensore che, rilevato un valore, causava l'attivazione di un indicatore fisico come una luce o un motore. Successivamente decise di progettare dei moduli hardware gestibili con un'interfaccia di programmazione facilmente utilizzabile da qualsiasi sviluppatore di software. Ogni componente (sensore, motore, pulsante) veniva presentato al programmatore come un semplice oggetto software ben documentato, senza che dovesse preoccuparsi della progettazione di circuiti elettronici.

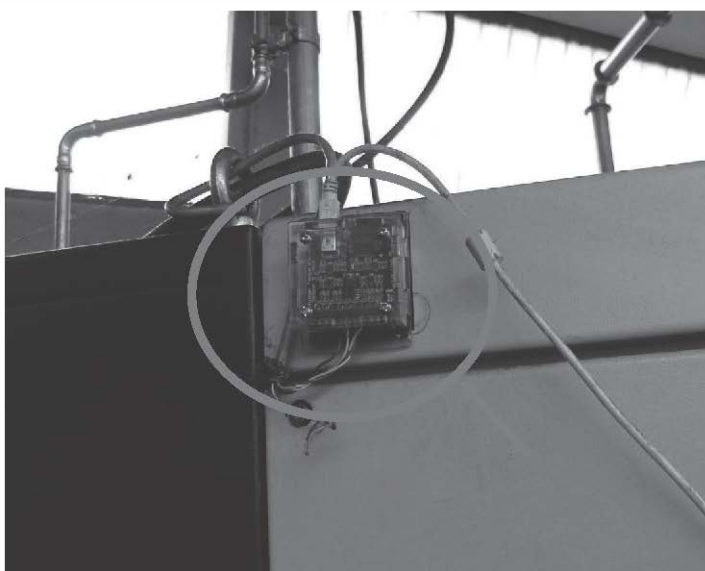


Figura 1: Esempio di FactoryMote applicato su un centro di lavoro.



Figura 2: Esempio di FactoryMote applicato su un tornio.

In FactoryMote ogni scheda funge da interfaccia per numerosi sensori che permettono di monitorare il singolo macchinario e l'ambiente di lavoro, grazie all'acquisizione in modo continuo di informazioni. Un esempio è il sensore di temperatura, che permette di interfacciarsi con delle termocoppie per rilevare la temperatura. La scheda di acquisizione funge inoltre da scheda I/O (input/output) flessibile, in grado cioè di registrare e controllare sensori analogici, ingressi e uscite

digitali. La combinazione di queste capacità consente di creare vasti sistemi in grado di rilevare l'ambiente esterno e di interagire con esso.

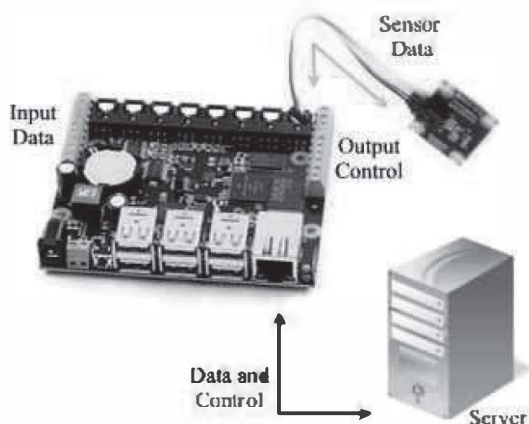


Figura 3: Esempio di scheda di acquisizione collegata in rete e ai sensori

2.1 - I SENSORI

Installati sui macchinari o in uno specifico locale, i sensori permettono di raccogliere dati sul singolo macchinario e sull'ambiente di lavoro.

Per FactoryMote, a seconda delle esigenze specifiche di ogni realtà aziendale, vengono generalmente utilizzati i seguenti sensori: distanza, forza, luce, vibrazioni, pH/ORP, prossimità, temperatura/umidità, tensione/corrente.

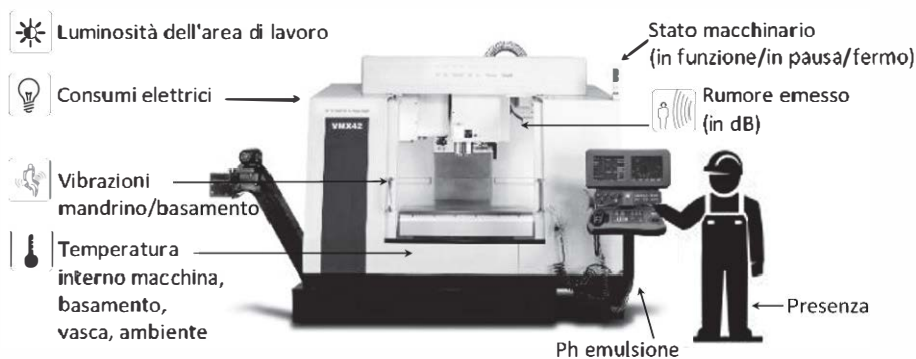


Figura 4: Alcuni parametri che FactoryMote è in grado di monitorare

La combinazione di dati raccolti da sensori di diverso tipo può fornire informazioni più elaborate. Abbinando ad esempio i dati dei sensori *Stato macchinario* e *Presenza*, è possibile inviare un messaggio di alert (al RSPP, al preposto ...) se il macchinario viene avviato con portellone aperto ed è presente un operatore. In questo caso si può andare a verificare perché il portellone è aperto (ad esempio si sta effettuando una manutenzione), se l'addetto indossa DPI idonei, se le regole di sicurezza sul lavoro sono rispettate.

2.1.1 – Il sensore fonometrico

Grazie all'utilizzo di un sensore fonometrico, FactoryMote permette di monitorare costantemente i livelli di rumore.

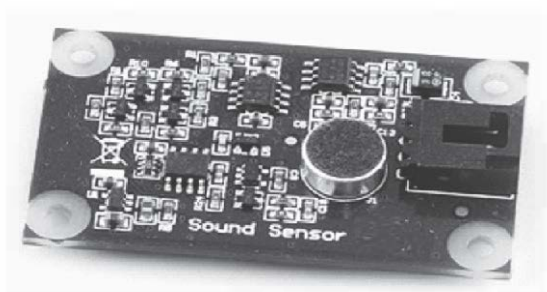


Figura 5: Esempio di sensore fonometrico

Il rumore viene definito come un suono che per frequenza, livello o variabilità nel tempo risulta disturbante o dannoso per l'uomo.

Gli effetti da esso causati possono essere ricondotti a due grandi classi, una riguardante i danni di tipo specifico (a carico dell'organo dell'udito o della funzione vestibolare) e l'altra più generica includente danni e disturbi di tipo neuro-endocrino e psicologico, psicosomatici o psicosociali (danni e disturbi extra-uditivi).

Le norme di riferimento per la determinazione del livello di esposizione personale al rumore nell'ambiente di lavoro sono la UNI 9432:2011 e la UNI EN ISO 9612:2011.

Dal punto di vista legislativo, la regolamentazione dell'esposizione al rumore per proteggere i lavoratori dai danni specifici in Italia è affidata al D.Lgs. 81/2008, il quale recepisce, tra le altre, la direttiva 2003/10/CE. La legge assume come parametri di riferimento dei valori d'azione superiori e inferiori (ovvero livelli di esposizione il cui superamento implica da parte delle aziende l'attuazione di specifiche misure di prevenzione e protezione a tutela dei lavoratori esposti) e dei valori limite (ovvero livelli di esposizione il cui superamento è vietato). È dunque fondamentale valutare se i lavoratori sono esposti al rischio rumore, analizzando tra quali valori è compresa la loro esposizione e identificando eventuali cofattori di rischio (sostanze ototossiche, presenza di lavorazioni a basse temperature, vibrazioni, segnali di allarme che possono causare pericolo, ecc.).

Nel caso in cui i valori di riferimento vengano superati, devono infatti essere messe in atto specifiche misure di prevenzione e protezione come:

- Informazione e formazione dei lavoratori;
- Obbligo di utilizzo di DPI uditivi idonei;
- Sorveglianza sanitaria a cura del medico competente;
- Rimessa in discussione delle diverse fasi del processo produttivo.

Il rischio da rumore al quale risulta esposto un lavoratore dipende essenzialmente da due parametri: il livello sonoro presente nella posizione di lavoro e il tempo di esposizione.

Poiché il livello di rumore è variabile nel tempo è necessario fare riferimento ad un livello energetico medio presente nel corso della durata dell'intera esposizione: il livello equivalente continuo di rumore (L_{Aeq}). Il L_{Aeq} è il valore che rappresenta il livello costante durante il periodo di misura, che contiene la stessa quantità di energia presente nel livello di pressione sonora fluctuante misurato. Generalmente il valore di L_{Aeq} viene misurato da un fonometro integratore che fornisce al termine del rilievo il livello energetico medio presente nella posizione in esame.

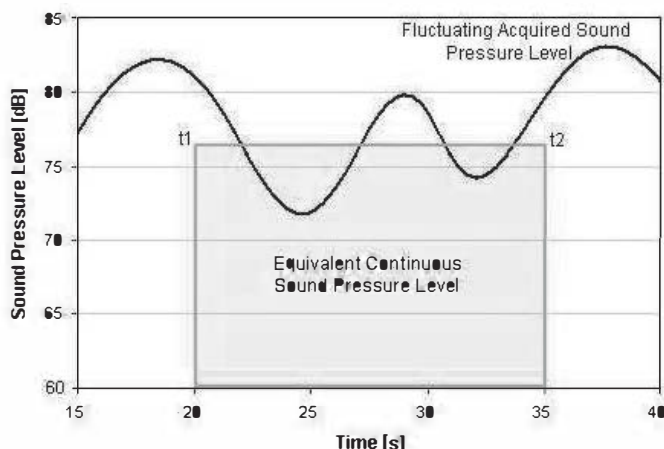


Figura 6: Esempio di misurazione del valore di L_{Aeq}

FactoryMote è in grado di raccogliere dati relativi al L_{Aeq} grazie alla collocazione sul macchinario di un sensore fonometrico che rileva suoni con frequenze comprese tra 100 Hz e 8 kHz e un livello di pressione sonora tra 50 dB a 100 dB.

Tabella 1: Proprietà del sensore fonometrico utilizzato

Sensor Type	Sound
Sensor Output Type	Non-Ratiometric
Sound Level Min	50 dB
Sound Level Max	100 dB
Sound Frequency Min	100 Hz
Sound Frequency Max	8 kHz
Sound Resolution	0.16 dB
Sound Error (at 1000 Hz)	±3 dB

Anche se con incertezze maggiori rispetto a quelle ottenute con la strumentazione professionale e alle tecniche di valutazione dell'esposizione a rumore conformi a quanto stabilito dalla UNI EN ISO 9612:2011, FactoryMote consente di misurare costantemente l'emissione del rumore della macchina che è poi anche il livello di esposizione del lavoratore mentre questi si trova ad operare sul macchinario e nelle sue immediate vicinanze. Affiancato alla Valutazione del Rischio Rumore, che

utilizza strumenti più precisi e conformi alle normative, l'utilizzo di un sensore fonometrico è particolarmente efficace perché permette un monitoraggio permanente del rumore, 24 ore al giorno per 365 giorni l'anno, controllando così il rispetto di predeterminati valori di emissione rumore e consentendo di acquisire un'ampia gamma di dati per ulteriori analisi che possono essere effettuate a posteriori. Grazie alle informazioni raccolte si può meglio tutelare la salute del lavoratore e, al contempo, le aziende possono valutare e analizzare in modo più approfondito il loro processo produttivo. In caso di emissioni eccessive sarà necessario agire tempestivamente tanto per riportare l'esposizione nei valori consueti quanto per capirne le cause ed evitare che la situazione si ripeta anche ai fini della durata dell'apparecchiatura.

3 – IL SOFTWARE

I dati rilevati vengono automaticamente inviati tramite rete LAN o WIFI a un server centrale collocato in azienda. Grazie all'utilizzo di un protocollo Apple, i sensori vengono mostrati come elenco. In seguito all'associazione sul gestionale dei gruppi di sensori ai diversi macchinari, è possibile visualizzare in tempo reale i dati raccolti. L'utente, tramite apposito software, può così monitorare in modo efficiente e costante le attività produttive.

FactoryMote permette di ricevere informazioni in tempo reale su macchinari e produzione, di analizzare i dati attraverso strumenti grafici e di utilizzare telecamere per il monitoraggio remoto di attività non presidiate.



Figura 7: Raccolta dati di monitoraggio sul singolo macchinario

I dati di produzione che FactoryMote è in grado di raccogliere possono essere separati in quattro macro aree:

- Qualità: monitoraggio di temperatura interna del macchinario e vibrazioni delle macchine presenti;
- Ambiente: acquisizione di dati su consumi elettrici, rumore e luminosità nell'ambiente di lavoro;