

# LA VALUTAZIONE DEI RISCHI IN RELAZIONE ALL'USO DI MAGNETI SUPERCONDUTTORI PER SPETTROSCOPIA DI RISONANZA MAGNETICA NUCLEARE

**Dante Milani, Davide Barbieri**

Università degli Studi di Pavia – Area Ambiente e Sicurezza

## INTRODUZIONE

Il presente lavoro affronta il problema della valutazione dei rischi (*risk assessment*) e dell'individuazione delle conseguenti misure di prevenzione e protezione in relazione all'uso di magneti superconduttori per spettroscopia RMN, considerata la normativa attualmente vigente ed il suo probabile sviluppo futuro. Oltre ai fattori di rischio direttamente collegati ai campi magnetici ed elettromagnetici sono considerati anche i caratteristici fattori di rischio collaterali ai campi medesimi e generalmente presenti in un laboratorio RMN.

## 1 - LA TECNOLOGIA RMN

La Risonanza Magnetica Nucleare (RMN) è una tecnica di indagine sulla materia basata sulla precessione degli spin di particolari nuclei (es. protoni di idrogeno) sottoposti ad un campo magnetico. Relativamente al funzionamento si possono individuare tre protagonisti:

- 1) campo magnetico statico (detto anche campo di polarizzazione);
- 2) specie nucleare con particolari proprietà;
- 3) campo elettromagnetico a radiofrequenza (detto anche campo di eccitazione).

A differenza delle imaging a risonanza magnetica, le RMN per spettroscopia, oggetto del presente lavoro, non utilizzano gradienti di campo magnetico, non essendo necessaria una codifica spaziale nel volume del campione sotto esame.

Gli spin dei nuclei attivi presenti nel campione, interagendo con il campo magnetico statico  $\vec{B}_0$ , sono sottoposti ad una coppia che ne provoca la rotazione attorno alla direzione di  $\vec{B}_0$  con una ben precisa pulsazione angolare  $\vec{\omega}_0$  (frequenza di Larmor) che dipende dal tipo di nucleo e dal modulo di  $\vec{B}_0$ ; pertanto, il campione inserito nel magnete superconduttore presenta nel suo volume una magnetizzazione netta,  $\vec{M}$ ,

nella direzione e verso di  $\vec{B}_0$ . L'applicazione di un secondo ed opportuno campo magnetico alternato  $\vec{B}_1$  (mediante un impulso, per comando dell'operatore), caratterizzato da una pulsazione angolare uguale ad  $\omega_0$  (risonanza), fa ruotare  $\vec{M}$  attorno a  $\vec{B}_0$  in un moto di precessione. La condizione di risonanza è espressa dalla relazione  $\omega_0 = \gamma B_0$ , dove  $\gamma$  è il rapporto giromagnetico che caratterizza il particolare nucleo (ad es. per  $^1\text{H}$ ,  $\gamma/2\pi = 42,58 \text{ MHz/T}$ ). Terminata l'azione perturbante del campo  $\vec{B}_1$ , il vettore magnetizzazione  $\vec{M}$  ritorna all'equilibrio tendendo al riallineamento con il campo  $\vec{B}_0$ ; il segnale prodotto dalla variazione nel tempo del vettore  $\vec{M}$  viene rivelato mediante una bobina ad induzione elettromagnetica (che si comporta come un'antenna) posta attorno al campione. Applicando un algoritmo matematico, la trasformata di Fourier, al segnale RMN (FID – Free Induction Decay), se ne determinano le componenti spettrali (frequenza di Larmor) ottenendo informazioni relative alle caratteristiche (chimico-fisiche e medico-biologiche) del campione esaminato senza in alcun modo distruggerlo o danneggiarlo.

## 2 - IDENTIFICAZIONE DEI FATTORI DI RISCHIO

I magneti superconduttori sono costituiti essenzialmente da un solenoide (con l'asse di simmetria verticale) percorso da corrente continua e mantenuto a bassissima temperatura per mezzo di liquidi criogenici contenuti in appositi dewars: all'esterno azoto liquido ( $T_{\text{eboll}} = 77 \text{ K}$ ), separato dal contenitore interno contenente l'elio liquido ( $T_{\text{eboll}} = 4,2 \text{ K}$ ) tramite il vuoto. I magneti superconduttori considerati nella presente relazione hanno campi magnetici al campione compresi tra 4,7 T e 9,4 T; l'approccio valutativo presentato può comunque essere applicato per RMN caratterizzate anche da campi magnetici più intensi.



Figura 1 - Esempio di RMN di ricerca

I fattori di rischio per la sicurezza e la salute, considerati nel presente lavoro, sono:

- 1) campo magnetico statico;
- 2) campo magnetico variabile;
- 3) campi elettromagnetici a radiofrequenza (RF);
- 4) trattamenti con i liquidi criogenici e quench;
- 5) incendio ed esplosione.

### 3 - VALUTAZIONE DEI RISCHI

La valutazione dei rischi seguente tiene conto di quanto espresso nel recente D.Lgs. 81/08 [1], in particolare di quanto affermato sia nell'art. 181 (Titolo VIII, Agenti fisici), dove il legislatore obbliga il datore di lavoro (e di conseguenza il Servizio di Prevenzione e Protezione) a valutare tutti i rischi derivanti da esposizione ad agenti fisici, che nell'art. 306, dove lo stesso legislatore asserisce che le disposizioni di cui al capo IV del Titolo VIII (Protezione dei lavoratori dai rischi di esposizione ai campi elettromagnetici) entreranno in vigore alla data fissata dal primo comma dell'art. 13, paragrafo 1, della Direttiva madre (2004/40/CE) [4], data oggi differita al 30/04/2012, in virtù della Direttiva 2008/46/CE [5], a causa della probabile revisione dei valori limite di esposizione e dei valori di azione.

#### 3.1 - CAMPO MAGNETICO STATICO

##### 3.1.1 - Valutazione secondo le Guidelines on Limits of Exposure to Static Magnetic Fields, ICNIRP 1994 ed il D.M. 02/08/1991 e s.m.i.

Per quanto sopra esposto, anche considerata la bozza finale del documento Fpr EN 50499 del CENELEC per il problema in esame, i valutatori devono trovare altri riferimenti normativi; come tali, per quanto riguarda il campo magnetico statico, si sono presi le *Guidelines on Limits of Exposure to Static Magnetic Fields* di ICNIRP 1994 [2] ed il D.M. 02/08/1991 e s.m.i [3] per quanto applicabile.

Nel caso di allestimento di un nuovo laboratorio, la prima fase della valutazione consiste nel verificare se l'isolinea a 0,5 mT (5G), fornita dal costruttore, è contenuta nel locale destinato ad ospitare il magnete (come esempio ed a tal fine, si nota che il magnete superconduttore di Fig.1 è stato posizionato in una buca costruita *ad hoc*, per evitare lo sconfinamento di detta isolinea nel locale superiore). A tal proposito si ricorda che il limite consigliato di 0,5 mT è solo in relazione ai pacemakers e defibrillatori cardiaci impiantati in alcune persone, dispositivi che potrebbero essere influenzati da livelli di campo magnetico superiore a tale limite; invece, per altri tipi di impianti ferromagnetici o dispositivi elettrici il limite indicato dalle Linee Guida ICNIRP 94 [2] è di alcuni mT. Successivamente alla prima fase è necessario effettuare la verifica della distribuzione dei valori di campo magnetico statico disperso, in particolare all'interno del laboratorio RMN. Nella Tabella 1, relativamente all'apparecchiatura di Figura 1 con campo centrale pari a 7,5 T, sono riportati i valori misurati del campo magnetico disperso per ogni mansione/posizione che comporta un'esposizione e per parte esposta; sono altresì riportati i tempi massimi dichiarati dal responsabile del laboratorio, utili per il calcolo della media pesata nel tempo per il corpo intero. Le misure indicate si sono eseguite con uno

strumento dotato di sonda ad effetto Hall. Nell'esempio riportato, indipendentemente dalle periodicità delle operazioni (rabbocco azoto, settimanale; rabbocco elio - superconduttore, mensile; rabbocco elio - circuiti a temperatura variabile, settimanale; introduzione campione e tuning, giornaliera; cambio campo, 10 volte per anno; comando consolle, giornaliera), ad esclusione dell'operazione di manutenzione, si deduce che la massima esposizione giornaliera è pari a 1,24 mT/giorno, valore decisamente inferiore ai 200 mT/giorno delle Linee Guida ICNIRP 94 [2]. Per le estremità, in virtù della mancanza di grosse arterie/vene e di organi critici, dette Linee Guida consentono un valore di campo fino a 5 T,

**Tabella 1** – Misure del campo magnetico disperso per le diverse mansioni/posizioni

<b>Mansione e Posizione</b>	<b>Parte Esposta</b>	<b>B (mT)</b>	<b>Tempi max dichiarati</b>	<b>Esposizione ponderata (mT/giorno)</b>
Rabbocco azoto	Corpo	4	15 (min/giorno)	0,13
	Arti super.	29	-	-
Rabbocco elio (superconduttore)	Corpo	4	30 (min/giorno)	0,25
	Arti super.	29	-	-
Rabbocco elio (circuiti a temp.tura variabile)	Corpo	10	15 (min/giorno)	0,31
	Arti super.	30	-	-
Introduzione campione	Corpo	4	30 (min/giorno)	0,25
	Arti super.	29	-	-
Tuning	Corpo	4	30 (min/giorno)	0,25
	Arti super.	29	-	-
Cambio campo	Corpo	0,2	2 (h/giorno)	0,05
Comando consolle	Corpo	0,07	360 (min/giorno)	0,05
Manutenzione (*) ~ 60 (min/anno)	Corpo	35	Raramente (°)	4,38
	Arti super.	400	-	-

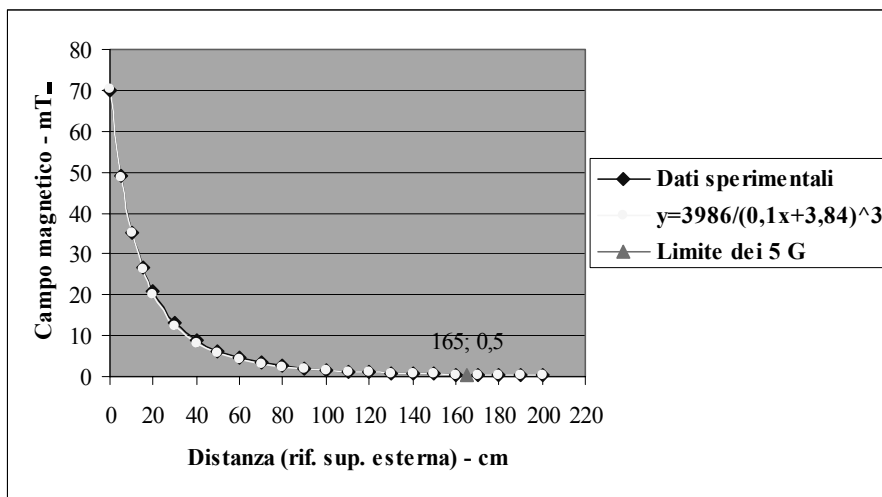
valore anch'esso ampiamente rispettato per l'esempio riportato (400 mT). Si osserva che il valore trovato di 1,24 mT/giorno, comunque significativo, va considerato di prima approssimazione, in quanto affetto sia dalle incertezze delle misure (dovute sostanzialmente alle variazioni nello spazio del campo magnetico ed ai movimenti dinamici dell'operatore durante la mansione), che dalle incertezze dei tempi dichiarati, per sicurezza leggermente sovrastimati. L'analisi condotta mostra con chiarezza che la massima esposizione si verifica in fase di manutenzione, quando l'operatore è costretto ad avvicinarsi al centro del magnete, sul fondo dell'apparecchiatura.

### **3.1.2 - Stima della massima corrente indotta per effetto Lorentz ad operatore fermo**

In relazione alla strategia protettiva a due livelli, valori limite di esposizione e valori di azione, adottata dalla Direttiva 2004/40/CE [4] anche per i campi magnetici statici (a differenza di quanto fatto da ICNIRP che ha tenuto separati i limiti dei campi

magnetici statici da quelli variabili, campi elettromagnetici), è di un certo interesse la stima delle grandezze dosimetriche.

Nel caso in esame si vuole stimare la densità di corrente indotta quando l'operatore staziona (dunque è fermo o si muove molto lentamente) nei pressi del magnete superconduttore. A tal fine, sfruttando la forza di Lorentz ( $\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$ ) e la relazione  $\vec{J} = \sigma_s \vec{E}$  (con  $\sigma_s$ , conducibilità nel sangue, pari a 0,52 S/m) è possibile valutare, in prima approssimazione, la densità di corrente di vortice a livello dell'arco aortico, considerata la velocità del sangue in quel tratto ( $\sim 0,42$  m/s) quasi perpendicolare alla direzione del campo magnetico disperso; per il valore del campo magnetico, da inserire nella formula di Lorentz, si è utilizzato il valore di 35 mT rilevato per l'operazione di manutenzione (Tabella 1), anche individuato a 10 cm dalla superficie esterna del magnete (Figura 2). A calcolo effettuato si trovano  $7,6$  mA/m<sup>2</sup>, a fronte del limite di  $40$  mA/m<sup>2</sup> indicato nella Direttiva 2004/40/CE [4], attualmente "congelata".



**Figura 2** – Misure radiali del campo magnetico disperso, all'altezza del centro del magnete, curva approssimante i dati sperimentali ed indicazione del limite dei 5G con il campo magnetico interno a 7,5 T; per la misura della distanza, il riferimento è la superficie esterna dell'apparecchiatura.

### 3.1.3 - Stima della massima corrente indotta per effetto Lorentz con operatore in movimento

Per completezza si annota solamente che l'effetto sopra descritto è presente anche quando l'operatore si muove nel campo magnetico; in questo caso, per la valutazione della densità di corrente indotta, occorrerebbe valutare meglio il prodotto vettoriale  $\vec{v} \wedge \vec{B}$ , con  $\vec{v}$  uguale alla somma vettoriale tra la velocità del sangue relativa all'uomo e la velocità dell'operatore. Considerata comunque la

velocità media dell'operatore non troppo dissimile dalla massima velocità del sangue e tenuto in considerazione l'andamento rapidamente decrescente del campo disperso (Figura 2), si ritiene che la densità di corrente possa essere, al più, leggermente superiore al valore di  $7,6 \text{ mA/m}^2$ , per frazioni di secondo, solo quando l'operatore si distacca dal magnete e comunque abbondantemente inferiore al limite della Direttiva 2004/40/CE.

Relativamente alla Figura 2 è interessante osservare che i valori di campo magnetico misurati sono molto ben approssimati da una funzione analitica con a denominatore il cubo della distanza radiale, tipica per un dipolo magnetico quando la distanza dal centro spira al punto di misura è molto superiore al raggio della spira.

### 3.2 - CAMPO MAGNETICO VARIABILE

Per valutare gli effetti del campo magnetico variabile è utile mettersi nel sistema di riferimento solidale con l'operatore che si muove all'interno del campo magnetico statico non uniforme prodotto dal magnete superconduttore; per effetto di detto movimento, il campo magnetico visto dal sistema solidale con l'operatore diventa variabile, dunque nei tessuti del medesimo operatore nascono delle correnti. Il modello analitico utilizzato per stimarle considera il massimo accoppiamento tra il campo magnetico disperso alla quota del centro del magnete ed il corpo umano, a contatto con la superficie esterna dell'apparecchiatura, modellato da un disco omogeneo di conducibilità del tessuto costante (non si considerano le reali differenti conducibilità dei diversi tessuti e, di questi, le loro proprietà anisotrope).

In dette condizioni, dalla legge dell'induzione elettromagnetica scritta in forma integrale

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot \vec{u}_n ds$$

dove L è la circonferenza ed S è la superficie della spira uomo, segue

$$J(r) = \frac{\sigma_t r}{2} \left| \frac{dB_{AVE}}{dt} \right| \quad (1)$$

dove  $J(r)$  è la densità di corrente indotta nella spira uomo di raggio  $r$ ,  $\sigma_t$  è la conducibilità del tessuto (pari a  $0,2 \text{ S/m}$ ) e  $B_{AVE}$  è il valore del campo magnetico medio che attraversa la spira uomo. La variazione  $|dB_{AVE}/dt|$  può essere calcolata mediante il prodotto

$$\left| \frac{dB_{AVE}}{dx} \right| \left| \frac{dx}{dt} \right|$$

dove il primo fattore indica la variazione del campo magnetico medio nella spira per unità di lunghezza ed il secondo fattore la velocità con cui l'operatore si muove nel campo. Pertanto, la massima densità di corrente indotta per effetto Faraday-Henry si ha quando l'operatore si muove in direzione radiale, ortogonalmente all'asse del magnete, a ridosso dello stesso e piuttosto velocemente.

Ragionando in termini di sicurezza, si può assumere una velocità dell'operatore pari ad  $1 \text{ m/s}$  e relativamente ai valori di  $|dB_{AVE}/dx|$  ed  $r$ , l'uno legato all'altro, si può mostrare che la condizione più sfavorevole si ha con una spira di raggio più grande

ed un  $B_{AVE}$  più piccolo. Per tal motivo, scegliendo un raggio di spira di 20 cm, sfruttando la curva analitica approssimante di Fig. 2 ed applicando il teorema della media per gli integrali doppi, per  $B_{AVE}$  si ottiene 23,01 mT (valore posizionato a circa 17,4 cm dalla superficie esterna dell'attrezzatura). Successivamente si calcola  $|dB_{AVE}/dx|$  ottenendo il valore di 123,8 mT/m. Finalmente, inserendo tutti i valori trovati nella (1), si trova il massimo valore stimato di densità di corrente indotta, pari a 2,47 mA/m<sup>2</sup>, da mettere a confronto con la restrizione di base di 40 mA/m<sup>2</sup> delle *Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)*, ICNIRP 1998 [6].

### 3.3 - CAMPI ELETTROMAGNETICI A RADIOFREQUENZA

Si è già accennato che il tipo di segnale utilizzato per il campo di eccitazione è tipicamente un impulso caratterizzato dalla frequenza di risonanza; per le RMN esaminate tale impulso dura non più di una decina di  $\mu$ s ed è trasmesso al campione sotto esame attraverso linee di trasmissione dedicate. In *single shot*, dopo l'impulso, segue necessariamente un tempo di rilassamento (affinché il vettore magnetizzazione  $\vec{M}$  ritorni nella posizione di partenza, parallelo a  $\vec{B}_0$ ) ed un tempo di attesa, entrambi dell'ordine di qualche secondo. Il segnale è a comando dell'operatore dalla consolle di controllo, posizionata, nei casi in esame, al più a 0,2 mT (2G); per il motivo anzidetto, a posteriori anche di una misura mediante un analizzatore di spettro ed un'antenna biconica condotta dal personale dell'ARPA di Pavia, si ritiene che i rischi da esposizione a RF abbiano scarsa rilevanza protezionistica.

### 3.4 - TRATTAMENTI CON I LIQUIDI CRIOGENICI E QUENCH

I rischi per la sicurezza e la salute, legati al trattamento dei liquidi criogenici, sono in parte dovuti alla grande differenza di temperatura tra gli stessi (soprattutto l'elio, il più freddo fra tutti i liquidi criogenici) ed il restante materiale a temperatura ambiente con il quale detti liquidi possono venire a contatto (riempire un contenitore caldo di liquido criogenico o mettere in questo un oggetto caldo provoca sempre ebollizione e spruzzi, in misura tanto superiore quanto maggiore è la differenza di temperatura in gioco, a parità di altre condizioni). D'altra parte, sia l'elio che l'azoto, pur considerando che sono elementi non tossici, essendo immagazzinati in contenitori in transizione di fase, evaporano gradualmente dalle porte predisposte causando, per un luogo non ventilato, una diminuzione della concentrazione di ossigeno.

Per *quench* s'intende la possibile rapida evaporazione di elio ed azoto contenuti negli appositi dewars; il rischio di *quench* dipende soprattutto dalla scorretta gestione delle operazioni di controllo e scorretta manutenzione da parte del personale addetto, oltre al tipo ed affidabilità dell'attrezzatura in considerazione.

Pertanto, i rischi per la sicurezza e la salute connessi al trattamento dei liquidi criogenici e al *quench* sono le bruciature e l'asfissia.

Le sostanze criogeniche, in forma liquida o di gas/vapore producono sulla pelle effetti simili alle bruciature (ustioni da freddo); infatti, l'esposizione diretta o insufficientemente protetta di parti del corpo in contatto con tubi non isolati

termicamente, sfiati, parti molto fredde ecc., produce rapidamente il loro incollamento, con il pericolo, se rimosse, dell'asportazione della pelle.

L'asfissia è dovuta alla diminuzione della percentuale volumica dell'ossigeno in aria ad un valore inferiore al 18%, conseguente ad una eccessiva fuoriuscita di detti liquidi criogenici. Si ricorda che l'elio tende a stratificare sotto il soffitto del laboratorio, mentre l'azoto tende a disporsi a livelli più bassi. A parte l'addestramento, il controllo e la manutenzione del personale addetto, il tipo e l'affidabilità dell'attrezzatura, il rischio potenziale di asfissia è funzione soprattutto del rapporto tra il quantitativo di liquidi criogenici immagazzinati nel locale RMN e la cubatura del locale stesso, considerata la posizione dei criostati nel locale e la ventilazione (ubicazione e tenuta di porte e finestre, condizionamento). Si accenna soltanto che, conoscendo questi ultimi dati, è possibile valutare in termini quantitativi la percentuale di ossigeno a disposizione dopo la dispersione di una qualsivoglia quantità di liquido criogenico e confrontarla con i valori della Tab. 2 per l'adozione delle conseguenti misure di prevenzione e protezione.

### **3.5 - RISCHIO INCENDIO E DI ESPLOSIONE**

Sebbene sia l'elio che l'azoto non supportino la combustione, il rischio incendio e di esplosione, in relazione al loro uso criogenico, è dovuto, in parte, al fatto che le loro basse temperature di condensazione sono entrambe inferiori alla temperatura di condensazione dell'ossigeno. Il loro freddo estremo può causare, su eventuali superfici esposte, la condensazione dell'ossigeno dell'aria e la crescita della sua concentrazione locale. Il rischio incendio e di esplosione aumenta se sulle superfici fredde è depositato dell'olio e del grasso o comunque sostanze combustibili.

Una seconda causa di esplosione è in relazione ai dewars semivuoti le cui porte di sfiato siano state chiuse completamente (ad es. accidentalmente o dal ghiaccio); in questo caso, a transizione di fase avvenuta, al salire della temperatura per un volume confinato sale inevitabilmente anche la pressione e con sé il rischio di esplosione (scoppio).

### **3.6 - CENNI AGLI ALTRI RISCHI**

Oltre ai rischi sopra considerati, all'interno di un laboratorio RMN sono presenti diversi altri rischi che costituiscono comunque obbligo di valutazione da parte del Datore di Lavoro e del Servizio di Prevenzione e Protezione: rischi connessi all'elettricità, ai videoterminali, alla movimentazione manuale dei carichi ed all'ergonomia; inoltre, in relazione al luogo di installazione della RMN (ad es. laboratorio chimico-biologico) ed al tipo di analisi che viene condotta possono sussistere ulteriori rischi di natura biologica, chimica, cancerogena o mutagena.

Per tutti questi rischi, non oggetto del presente lavoro, si rimanda il lettore ad ulteriori approfondimenti.

## **4 - MISURE DI PREVENZIONE E PROTEZIONE**

Di seguito sono indicate le misure di prevenzione e protezione caratteristiche e di particolare importanza per un impianto RMN di ricerca; ciò che è indicato



costituisce un *set minimo* di requisiti e non esaurisce ogni eventualità di rischio per la sicurezza e la salute. Ulteriori misure potranno/dovranno essere identificate attraverso la necessaria lettura del manuale di installazione, uso e manutenzione dell'attrezzatura e la lettura delle schede di sicurezza dell'elio e dell'azoto refrigerati, nonché attraverso la consulenza specifica del costruttore e a posteriori di una valutazione dei rischi condotta impianto per impianto.

#### 4.1 - CAMPI MAGNETICI ED ELETTROMAGNETICI

Ai fini della *safety* si possono definire due zone ad accesso regolamentato:

- 1) zona ad accesso controllato;
- 2) zona di esposizione.

La zona ad accesso controllato è costituita dall'intero locale dove sono installati i magneti superconduttori.

Ai suoi ingressi deve essere affissa segnaletica regolamentare e permanente, atta ad indicare con chiarezza la presenza di campi magnetici e a radiofrequenza ed il divieto di accesso ai seguenti soggetti (a meno di casi particolari preventivamente autorizzati):

- portatori di pacemaker e defibrillatori impiantati;
- portatori di protesi metalliche, clips e preparati metallici, materiale ferromagnetico, dispositivi suscettibili ai campi magnetici ecc.;
- donne in stato di gravidanza;
- persone affette da anemia falciforme.

La zona di esposizione è definita come la zona all'interno della quale l'individuo è esposto ad un livello di campo magnetico superiore a 0,5 mT (5G); tale zona deve essere delimitata in maniera ben visibile, ad es. mediante strisce adesive sul pavimento o idonee catenelle.

All'interno della zona di esposizione possono accedervi solo i soggetti privi di controindicazioni ai campi magnetici ed autorizzati dopo essersi liberati di oggetti metallici o comunque suscettibili ai campi magnetici (ad es. utensili, chiavi, monete, tessere magnetiche, dischetti software, penne, orologi, cellulari, ecc.). Si ricorda infatti che, a causa delle forze intense ed attrattive (in zona di esposizione), piccoli pezzi di natura metallica possono diventare proiettili ed essere fonte di serio pericolo per gli operatori.

Considerate le misure e le stime effettuate in sede di valutazione dei rischi, per le RMN oggetto del presente lavoro, non si ritiene necessario l'adozione di ulteriori e stringenti misure di prevenzione e protezione, con eccezione delle seguenti indicazioni, conseguenti più *dell'operare correttamente* che della necessità di risolvere *bisogni contingenti* di sicurezza:

- nella zona di esposizione può accedervi solo personale adeguatamente formato, addestrato ed informato sui rischi al quale è esposto;
- nella zona di esposizione è consigliato svolgere le operazioni strettamente necessarie all'attività in corso, evitando esposizioni ai campi magnetici ingiustificate;
- spegnere il superconduttore in caso di operazioni molto vicine al centro del magnete e non contemplate nella Tabella 1.

#### 4.2 - TRATTAMENTI CON I LIQUIDI CRIOGENICI E QUENCH

Per l'uso e lo stoccaggio di liquidi criogenici, in virtù di quanto descritto nel processo di valutazione dei rischi, è indispensabile una buona ventilazione di base. Per il trattamento sicuro dei liquidi criogenici, oltre all'addestramento, è necessario un processo di formazione che fornisca, in particolare, un'adeguata conoscenza delle proprietà dei liquidi criogenici ed una capacità sufficiente di predire il loro comportamento in determinate condizioni fisiche. L'uso dei dispositivi di protezione individuale (guanti in cuoio o PVC, maschere e visiera) è comunque necessario per proteggersi dal rischio schizzi e bruciature.

Relativamente al rischio *quench*, la procedura essenziale per renderlo minimo consiste nel controllare quotidianamente i livelli di azoto ed elio liquidi nei dewars del superconduttore; è consigliato registrare tali valori per verificare il valore dei successivi decrementi. Relativamente all'emergenza, in Tabella 2 sono descritte le misure di prevenzione e protezione consigliate dal Servizio di Prevenzione e Protezione dell'Università degli Studi di Pavia in funzione della percentuale di O<sub>2</sub> a disposizione a valle del massimo incidente ipotizzabile.

**Tabella 2** – Misure di prevenzione e protezione contro il rischio di asfissia

<b>Percentuale di O<sub>2</sub> a disposizione dopo il massimo incidente ipotizzabile</b>	<b>Misure di prevenzione e protezione</b>
$O_2\% \geq 20\%$	Non sono necessarie ulteriori misure di prevenzione e protezione, è sufficiente la ventilazione di base.
$18\% < O_2\% < 20\%$	Installazione di un rivelatore di ossigeno ad una sola soglia, adeguata formazione ed addestramento degli operatori per l'emergenza.
$O_2\% \leq 18\%$	Installazione di un rivelatore di ossigeno a due soglie (20% e 18%), dispositivi supplementari di aspirazione gas, adeguata formazione ed addestramento degli operatori per l'emergenza.

#### 4.3 - RISCHIO INCENDIO E DI ESPLOSIONE

Il risultato della valutazione dei rischi indica con chiarezza la necessità di tenere al minimo possibile il contatto tra i liquidi criogenici o parti molto fredde e l'aria e di evitare la completa chiusura dei contenitori di liquido criogenico.

Una procedura di sicurezza consiste nel verificare quotidianamente la presenza del *boil-off*. Se il *boil-off* è assente dovrebbero essere immediatamente controllati i condotti di uscita per scongiurare la presenza di ghiaccio. Nel caso dell'elio, la procedura di controllo delle vie di uscita e la rimozione di qualsivoglia blocco dovrebbe essere effettuata solo da tecnici con una notevole esperienza nel trattamento di liquidi criogenici.

In caso di incendio non deve essere usata l'acqua sia perché si è in presenza di parti elettriche, sia perché l'acqua a contatto con parti molto fredde determina la formazione di ghiaccio che può impedire la fuoriuscita di elio ed azoto allo stato gassoso con pericolo di esplosione. Data la presenza di forti campi magnetici, nel locale, devono essere utilizzati estintori non magnetici.

## **5 - CONCLUSIONI**

L'art. 181 (Titolo VIII, Agenti fisici) del D. Lgs. 81/08 obbliga il datore di lavoro (e di conseguenza il Servizio di Prevenzione e Protezione) a valutare tutti i rischi derivanti da esposizione ad agenti fisici, in particolare quelli dovuti ai campi elettromagnetici.

La prima conclusione del presente lavoro è l'identificazione e la valutazione dei fattori di rischio caratteristici per un impianto per spettroscopia RMN e l'indicazione delle conseguenti misure di prevenzione e protezione. In sintesi si può affermare che un impianto RMN espone gli operatori (in generale le persone che frequentano il sito che ospita il locale RMN) ad un insieme di rischi, alcuni dei quali rilevanti, che possono essere minimizzati e resi di livello contenuto mediante un'ideale installazione dei magneti superconduttori e degli eventuali dispositivi di sicurezza e la scelta di personale non avente controindicazione all'esposizione ai campi magnetici, formato ed addestrato, diligente nell'effettuare i necessari controlli e la necessaria manutenzione, seguendo un corretto set di procedure di lavoro. Particolare attenzione è stata rivolta alla valutazione dei campi magnetici ed ai fondamenti per un trattamento sicuro dei liquidi criogenici.

La seconda conclusione nasce dall'osservazione che lo Stato Italiano, nei confronti dell'esposizione ai campi elettromagnetici del personale professionalmente esposto, ha adottato la strategia protettiva a due livelli, valori limite di esposizione e valori di azione, caratterizzante la filosofia ICNIRP ed adottata dalla Direttiva 2004/40/CE. A tal proposito, in caso di superamento dei valori di azione, nella necessità di dover valutare le grandezze dosimetriche si sono stimate, mediante semplici modelli analitici, le massime densità di corrente, nelle componenti della densità di corrente di vortice nel sangue e di quella che si origina nei tessuti a causa del movimento del corpo nel campo magnetico.

### **Ringraziamenti**

Gli autori ringraziano il Prof. Maurizio Corti e la Prof.ssa Mariella Mella, rispettivamente del Dipartimento di Fisica A. Volta e del Dipartimento di Chimica Organica dell'Università degli Studi di Pavia, per la disponibilità mostrata e le informazioni fornite in relazione alle attività svolte presso i rispettivi laboratori RMN da loro diretti, il Prof. Elio Giroletti del Dipartimento di Fisica Nucleare e Teorica dell'Università degli Studi di Pavia per le trascorse valutazioni effettuate su impianti RMN dell'Ateneo pavese e la Dott.ssa Cristina Bosio dell'ARPA di Pavia per la competente misura sulle radiofrequenze.

## 6 - BIBLIOGRAFIA

- [1] D.Lgs. 81/08 - Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro;
- [2] ICNIRP - Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields; Health Physics, Genuary 1994;
- [3] D.M. 02/08/1991 e s.m.i. - Autorizzazione alla installazione ed uso di apparecchiature diagnostiche a risonanza magnetica;
- [4] Direttiva 2004/40/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 29 aprile 2004, sulle prescrizioni minime di sicurezza e di salute relative all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici (campi elettromagnetici);
- [5] Direttiva 2008/46/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 23 aprile 2008, che modifica la Direttiva 2004/40/CE sulle prescrizioni minime di sicurezza e di salute relative all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici (campi elettromagnetici);
- [6] ICNIRP - Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz); Health Physics, April 1998.