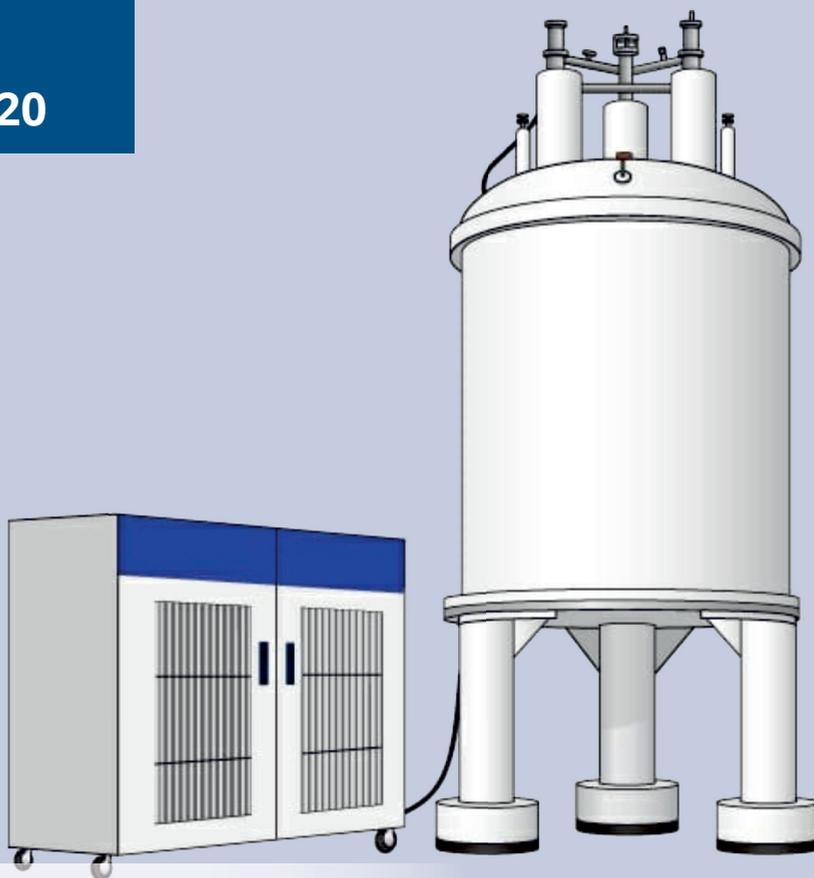


UTILIZZO IN SICUREZZA DELLA SPETTROSCOPIA NMR

INAIL

VALUTAZIONE DEL RISCHIO E
INDICAZIONI OPERATIVE

2020



COLLANA **SALUTE E SICUREZZA**

UTILIZZO IN SICUREZZA DELLA SPETTROSCOPIA NMR

INAIL

VALUTAZIONE DEL RISCHIO E
INDICAZIONI OPERATIVE

2020

Pubblicazione realizzata da

Inail

Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale

Coordinamento scientifico

Francesco Campanella¹

Autori

Francesco Campanella¹, Massimo Mattozzi¹, Massimiliano Di Luigi¹, Nicola Culeddu², Eleonora Ragno³

Editing e grafica

Pina Galzerano¹, Emanuela Giuli¹

¹ Inail - Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale

² Cnr - Istituto di chimica biomolecolare, Dipartimento di progettazione molecolare di Sassari

³ Cnr - Unità di prevenzione e protezione di Roma

per informazioni

Inail - Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale

Via Fontana Candida, 1 - 00078 Monte Porzio Catone (RM)

dmil@inail.it; fr.campanella@inail.it

www.inail.it

©2020 Inail

ISBN 978-88-7484-602-3

Gli autori hanno la piena responsabilità delle opinioni espresse nelle pubblicazioni, che non vanno intese come posizioni ufficiali dell'Inail.

Le pubblicazioni vengono distribuite gratuitamente e ne è quindi vietata la vendita nonché la riproduzione con qualsiasi mezzo. È consentita solo la citazione con l'indicazione della fonte.

PREMESSA

L'impegno della Sezione di supporto tecnico al Servizio sanitario nazionale (SSN) in materia di radiazioni del Dipartimento di medicina epidemiologia igiene del lavoro e ambientale dell'Inail, per tutto ciò che attiene l'utilizzo in sicurezza delle tecnologie di diagnostica per immagini a scopo medico, è ormai ben nota a livello nazionale anche per il ruolo di autorità competente che la norma assegna all'Istituto in tale ambito. È però interessante notare come lo sviluppo di un modello di gestione della sicurezza, che le indicazioni operative dell'Inail hanno largamente contribuito a promuovere in questi anni, non si è accompagnato a una esportazione di tale modello ad ambiti ugualmente significativi come per esempio la ricerca scientifica non clinica o la veterinaria, nei quali la risonanza magnetica è comunque largamente utilizzata. Ciò è dovuto essenzialmente a una lacuna normativa nonché alla mancanza di quella sistematica attività di vigilanza che nell'ambito medico continua a vedere l'Istituto fortemente coinvolto. Con il presente lavoro che aggiorna, superandolo, quello sperimentale del 2011 si intende proporre per i laboratori NMR (Nuclear Magnetic Resonance) che utilizzano la spettrometria tramite risonanza magnetica un percorso di acquisizione della consapevolezza del rischio unitamente a un modello di gestione del medesimo che sia improntato a regole concrete e applicabili, frutto anche dell'esperienza dei partner di Istituto che in questi anni hanno provato a utilizzare le precedenti indicazioni dell'Istituto

Sergio Iavicoli

*Direttore del Dipartimento di medicina,
epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale*

INDICE

1. Introduzione	7
2. La spettrometria NMR	10
2.1 Descrizione di uno spettrometro NMR	10
2.2 Le attuali applicazioni della tecnica NMR	12
2.3 Le apparecchiature NMR installate in Italia e l'attuale livello di sicurezza	12
3. Le novità in materia di tutela dei lavoratori esposti ai campi elettromagnetici apportate dal d.lgs. 159/2016 che impattano sulle attività che utilizzano spettrometri NMR	17
3.1 Il ruolo del responsabile del servizio di prevenzione e protezione e del medico competente	18
3.2 La valutazione del rischio nei laboratori NMR ospitanti spettrometri ad altissimo campo	20
3.3 La valutazione del rischio da CEM nei laboratori NMR: proposta di un modello operativo	22
4. Indicazioni operative di carattere generale per la gestione della sicurezza nei laboratori NMR	25
4.1 Gli specialisti del rischio	25
4.1.1 Il responsabile impianto e procedure di utilizzo in ambito NMR (RIPU)	26
4.1.2 L'Esperto Responsabile per la gestione degli aspetti di sicurezza (ERGAS)	26
4.2 Classificazione delle zone di rischio	27
4.2.1 Zona controllata	27
4.2.2 Zona di rispetto	29
4.3 Il personale autorizzato ad operare in zona controllata	31
4.4 Attenzioni particolari relative all'introduzione di materiale ferromagnetico nel laboratorio NMR	32
5. Soluzioni di sicurezza ottimali in relazione agli impianti	34
5.1 Le tubazioni di quench per l'evacuazione dell'elio negli spettrometri NMR	42
5.2 L'utilizzo di sistemi di analisi automatizzati	43
6. Limitazione delle esposizioni durante le operazioni di tuning	44

7. Approccio semplificato alla valutazione del rischio per gli spettrometri NMR privi di impianti di evacuazione per gas criogeni	46
8. Aspetti relativi al rischio incendio	49
9. Regolamento di sicurezza	50
9.1 Norme generali di sicurezza	50
9.2 Norme di sicurezza per i lavoratori	52
9.2.1 Sorveglianza sanitaria per i lavoratori	53
9.3 Norme specifiche per il personale addetto alle pulizie	53
9.4 Norme specifiche per il personale addetto alla manutenzione dell'apparecchiatura NMR	54
9.5 Norme per l'impiego di sostanze criogene	54
9.6 Norme specifiche per il personale addetto alle manutenzioni	56
9.7 Norme di sicurezza per ospiti e visitatori	57
10. Le emergenze	58
10.1 Quench del magnete con perdite di elio all'interno del laboratorio NMR	58
10.2 Allarme ossigeno	58
10.3 Emergenza incendio	59
10.4 Black out elettrico	59
10.5 Incidenti per introduzione di oggetti ferromagnetici	59
Conclusioni	60
Bibliografia e sitografia	61
Riferimenti normativi	62
Acronimi	63

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 trenta anni, 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 d.p.r. 542/1994, ovvero alle disposizioni del d.m. salute 10/08/2018, 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 espresso in precedenza 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 di inserimento del campione.

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 (si veda Figura 1). 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 trentacinque anni fa, le quali presentavano peraltro livelli di rischio complessivo notevolmente inferiori a quelli attuali.

Figura 1

Installazioni di spettrometri NMR



Immagini fornite da Bruker

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 indicazioni operative che possano essere utili per la valutazione e la minimizzazione del rischio, avendo come riferimento unico normativo quello del d.lgs. 81/2008 e s.m.i., così come modificato ed integrato dal d.lgs. 159/2016 per quanto concerne l'esposizione dei lavoratori ai campi elettromagnetici.

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.

In tal senso la presente pubblicazione aggiorna la analoga pubblicazione Inail 2011, proponendo strumenti operativi più concreti ed applicabili, mettendo a sistema le risultanze provenienti dalle esperienze degli stakeholder che in questi anni hanno inteso provare a mettere in pratica le indicazioni operative precedenti. Ne consegue la proposta di un modello di valutazione e di gestione del rischio che parte da un approccio meno teorico del precedente e più focalizzato su una serie di aspetti ulteriori che non trovavano così spazio nella precedente pubblicazione, comunque prevedendo anche la possibilità di una semplificazione che - nel caso si verifichino le giuste condizioni - consenta la concretizzazione di strategie prevenzionistiche più facilmente perseguibili.

2. LA SPETTROMETRIA NMR

La spettroscopia di risonanza magnetica nucleare (NMR) è una tecnica analitica strumentale che permette di ottenere informazioni dettagliate sulla struttura delle molecole osservando il comportamento dei nuclei atomici in un campo magnetico. Dopo aver immerso la molecola in esame in un forte campo magnetico, si misura l'assorbimento di una radiazione di frequenza radio (da 100 a 1000 MHz) che provoca transizioni di spin nucleare in particolari atomi come ^1H o ^{13}C .

2.1 DESCRIZIONE DI UNO SPETTROMETRO NMR

Uno spettrometro NMR (vedi Figura 2) si compone di un avvolgimento superconduttore immerso in una camicia di elio liquido a sua volta attornata da una camicia di azoto liquido (vedi Figura 3).

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 quelle 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* (vedi Figura 4), 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.

Figura 2

Uno spettrometro NMR



Immagine tratta da Cerm

Figura 3

Configurazione di un tipico spettrometro NMR

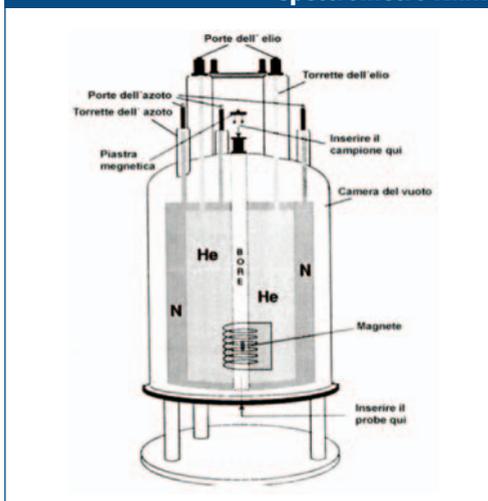
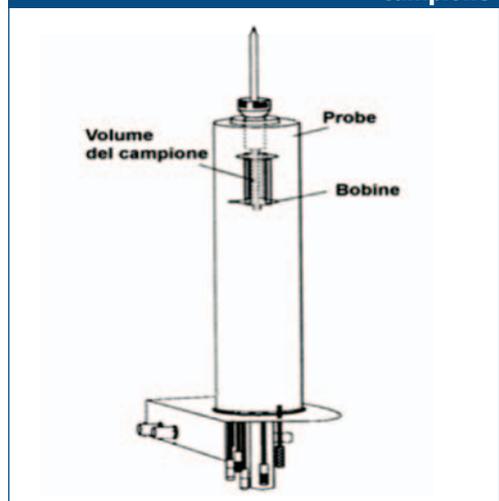


Figura 4

Probe e alloggiamento del campione



Immagini tratte dai libretti di istruzioni di spettrometri NMR Bruker

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 questo 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, suscitano 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; 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 magnetici statici da 4.7 e 7 tesla), con contenuti di elio liquido pari a diverse decine di litri.

Le apparecchiature di nuova generazione (vedi Figura 5) vanno invece mediamente da 400 a 600 MHz, con alcune che possono arrivare anche fino a 800 MHz (circa 19 tesla). A quanto risulta a questo Istituto, vi è almeno uno spettrometro in Italia da 1200 MHz (28 tesla), contenente diverse centinaia di litri di elio, installato presso il Cerm (Centro risonanze magnetiche) di Firenze.



Immagine fornita direttamente da Agilent

I contenuti di elio all'interno delle apparecchiature sopra rappresentate 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 e s.m.i.

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 singo-

la 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 infatti 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, sempre nel caso delle apparecchiature più moderne, è prevista l'individuazione e il confinamento della zona di rischio fino a 0,5 millitesla (5 Gauss) : ad un tale livello di campo, o a livelli superiori, non devono essere previste postazioni di lavoro, attività di laboratorio, o comunque attività che comportino la permanenza del personale autorizzato oltre il tempo necessario a svolgere le operazioni necessarie per il funzionamento e la messa a punto della apparecchiatura all'interno dell'ambito applicativo di cui trattasi (es: operazioni di introduzione del campione, di tuning, di refilling dei criogeni, ecc.).

In particolare si rileva che le operazioni d'introduzione del campione sono effettuate sulla sommità delle apparecchiature, raggiungibili anche mediante scale (vedi Figura 6), al fine di calare all'interno del magnete il probe contenente il campione da investigare.

Figura 6

Installazioni correlate a differenti set up degli spettrometri NMR



Immagini fornite da Bruker

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 e s.m.i.

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 (vedi Figura 7). 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.

Figura 7 Valvola a tappo tarata ad un valore massimo di pressione interna che, in caso di surriscaldamento del magnete, si apre liberando l'elio nell'ambiente



Immagine fornita da Agilent

Nella Figura 8, è riportato un esempio di quench avvenuto in laboratori NMR privo di tubazione di quench dedicata per l'evacuazione dell'elio all'esterno. 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.

Figura 8

Esempio di quench in un laboratorio NMR



Immagine tratta dai libretti di istruzioni di spettrometri NMR Bruker

3. LE NOVITÀ IN MATERIA DI TUTELA DEI LAVORATORI ESPOSTI AI CAMPI ELETTROMAGNETICI APPORTATE DAL D.LGS. 159/2016 CHE IMPATTANO SULLE ATTIVITÀ CHE UTILIZZANO SPETTROMETRI NMR

L'esposizione ai campi elettromagnetici può comportare due tipologie di effetti potenzialmente dannosi per la salute e la sicurezza dell'uomo, e che possono essere: di tipo diretto, derivanti dalla loro interazione con i tessuti e gli organi del corpo umano e di tipo indiretto, dovuti alla loro interferenza con eventuali dispositivi medici impiantati, sia attivi che passivi.

Gli effetti diretti possono essere sia di natura termica che non termica, e i loro valori limite di esposizione (VLE) sono disciplinati, per i lavoratori, nel d.lgs. 81/2008 e s.m.i. nel Titolo VIII, Capo IV (integrato e modificato dal d.lgs. 159/2016). Gli effetti indiretti, invece, possono avere rilevanza anche a bassi livelli di esposizione, comportando possibili conseguenze - anche gravi - sulla salute.

Il d.lgs. 81/2008 ha recepito la direttiva europea 2013/35/UE, e riguarda i soli effetti a breve termine provocati dall'esposizione dei lavoratori ai campi elettromagnetici, escludendo quindi gli effetti a lungo termine sui quali ad oggi non risultano esserci evidenze scientifiche significative.

Per la protezione della popolazione, invece, i limiti di esposizione sono indicati nella raccomandazione europea 1999/519/CE, che stabilisce pari a 40 mT il limite di esposizione oltre il quale sussiste il potenziale rischio di insorgenza di effetti sull'uomo (escludendo ovviamente gli effetti indiretti).

Nelle applicazioni NMR la principale fonte di esposizione del lavoratore ai campi elettromagnetici è quella relativa al campo magnetico statico che, secondo quanto stabilito dal d.lgs. 81/2008 e s.m.i., assume rilevanza per esposizioni al di sopra di 2 tesla per quanto concerne gli effetti di tipo sensoriale, mentre per gli effetti sanitari il valore è fissato a 8 tesla.

Nella maggior parte degli spettrometri installati sul territorio nazionale di piccola e media potenza, in cui il campo magnetico statico è per lo più contenuto all'interno dello spettrometro - o in stretta prossimità dello stesso - non si riscontrano superamenti del valore limite per gli effetti sensoriali pari a 2 tesla. In genere, pertanto, al di fuori del volume occupabile dell'apparecchiatura, l'esposizione dei lavoratori ai campi elettromagnetici non comporta rischi significativi dovuti ad effetti diretti.

Al contrario, per i soggetti in cui siano presenti particolari controindicazioni all'esposizione ai campi elettromagnetici, quali ad esempio le persone portatrici di dispositivi impiantabili attivi, il d.lgs. 81/2018 stabilisce un valore di azione pari a 0,5 mT, quindi notevolmente inferiore ai 2 T previsti per gli effetti sensoriali, al di sopra del quale i dispositivi di cui trattasi interagiscono pericolosamente con il campo magnetico statico.

Pertanto è necessario, per la quasi totalità delle installazioni NMR, delimitare le zone dove il campo magnetico statico eccede o è uguale a 0,5 mT e predisporre adeguate misure di controllo preventivo all'accesso - nelle medesime zone - ai soggetti non autorizzati, che, potenzialmente, potrebbero avere controindicazioni all'esposizione ai campi elettromagnetici (analogamente a quanto già accade dal 1991 nei siti ove sono installate apparecchiature a risonanza magnetica ad uso medico diagnostico, in virtù delle norme regolamentatrici in materia, che si sono susseguite da allora)¹.

In merito ai dispositivi impiantati di tipo passivo (sia a carattere medico e non medico) il decreto non stabilisce un particolare valore di azione, pertanto si rimanda alla valutazione da effettuare caso per caso. Uno strumento utile da utilizzare a tal fine è rappresentato dalle *Indicazioni operative del coordinamento tecnico della sicurezza nei luoghi di lavoro delle regioni e delle provincie autonome*, recentemente revisionato e consultabile nel portale agenti fisici Inail - Regione Toscana URL: <https://www.portaleagentifisici.it/> [consultato dicembre 2019].

3.1 IL RUOLO DEL RESPONSABILE DEL SERVIZIO DI PREVENZIONE E PROTEZIONE E DEL MEDICO COMPETENTE

Ai sensi dell'art. 181 comma 2 del d.lgs. 81/2008 il datore di lavoro per effettuare la valutazione dei rischi, deve avvalersi di personale qualificato² quale può essere il responsabile del servizio di prevenzione e protezione o altro tecnico.

A differenza dei siti con apparecchiature RM ad uso medico diagnostico, dove la normativa vigente prevede necessariamente la nomina da parte del datore di lavoro dell'esperto responsabile per la sicurezza quale figura professionale responsabile della sicurezza fisica e, in particolare, per la valutazione dei rischi da campi elettromagnetici (CEM) negli altri ambiti lavorativi ove si utilizza la tecnologia NMR (spettrometria NMR, RM ad uso veterinario, ecc.) non esiste il medesimo obbligo di legge. Pertanto, al di fuori del settore medico diagnostico, è il datore di lavoro che individua nel RSPP o in altro personale qualificato la figura che si deve occupare della valutazione dei rischi da CEM in applicazione del d.lgs. 81/2008 e s.m.i.

In tal senso il medesimo è tenuto a dialogare con il datore di lavoro per valutare sia gli ambienti interessati al fattore di rischio di cui trattasi, e sia il numero e la tipologia dei lavoratori coinvolti, al fine di determinare così le misure di sicurezza da intraprendere per garantire la minimizzazione de rischio.

¹ Trattasi del d.m. sanità 02/08/1991, e successivamente del d.m. salute 10/08/2018 che lo ha abrogato.

² Operatore che abbia sostenuto un corso di qualificazione conclusosi con una valutazione positiva e documentabile dell'apprendimento. In assenza di qualsiasi riferimento su durata e contenuti del corso e sui soggetti autorizzati alla valutazione ed all'espressione della certificazione finale, il personale qualificato va giudicato essenzialmente sulla base del curriculum, che deve evidenziare la competenza sull'utilizzo di spettrometri ad alto campo, e sulla valutazione dell'esposizione a CEM attraverso l'utilizzo di strumentazione adeguata, ovvero rispondente ai requisiti previsti dalle norme di buona tecnica applicabili.

Alla luce di quanto sopra, il datore di lavoro - nei laboratori NMR - è tenuto - almeno nel caso di spettrometri a campo particolarmente alto (quelli di più recente introduzione sul mercato), ove tale prescrizione sia suggerita dai fabbricanti, o sia comunque considerata dal suo consulente 'qualificato' una misura di prevenzione necessaria - a delimitare e segnalare le aree in cui si superano 0.5 mT, per impedire il libero accesso a tutti i soggetti con controindicazioni specifiche. Oltre a ciò, i lavoratori 'esposti', ovvero che operino in continuità nelle aree di rischio, devono essere sottoposti a sorveglianza medica periodica³. Tale sorveglianza dovrà essere garantita sia per i lavoratori abituali, opportunamente individuati in un elenco di soggetti opportunamente individuati come autorizzati, sia per tutti coloro che per qualsiasi motivo debbano accedere nelle zone di rischio. Per i lavoratori, l'unica figura professionale deputata a valutare la presenza di eventuali controindicazioni all'esposizione ai campi elettromagnetici è il medico competente, che, incaricato dal datore di lavoro, è tenuto a verificare la compatibilità dei soggetti su cui espleta la sorveglianza medica al contesto lavorativo in cui sono inseriti, esprimendo un giudizio di idoneità alla mansione svolta. Il medico competente pertanto collabora attivamente con il datore di lavoro e con il servizio di prevenzione e protezione nella valutazione dei rischi e nell'individuazione delle corrette misure di prevenzione e di sorveglianza sanitaria da intraprendere, al fine di garantire il massimo standard di sicurezza e prevenzione per i lavoratori. Il datore di lavoro è tenuto, inoltre, a rendere edotto il lavoratore sui rischi presenti nell'ambiente di lavoro in cui è chiamato ad operare, mediante una specifica attività di formazione/informazione concernente la spiegazione dei rischi legati all'attività lavorativa svolta, i comportamenti da tenere per ridurre al minimo i livelli di esposizione, le modalità per prevenire scenari di rischio e per gestire eventuali situazioni incidentali.

Mentre per i lavoratori abituali dei laboratori NMR, opportunamente individuati in un elenco di autorizzati, è il medico competente a valutare lo stato di compatibilità con il rilascio di un giudizio di idoneità specifica, per tutti coloro che occasionalmente dovessero accedere nelle zone con campo di induzione magnetica statica superiore a 0.5 mT occorre codificare delle procedure atte a garantire la verifica dello stato di compatibilità all'esposizione ai CEM.

A tal fine, in analogia con quanto è già previsto in ambito RM ad uso diagnostico, è opportuno prevedere la somministrazione - alle persone non individuate nell'elenco del personale autorizzato che debbano accedere nei locali esposti ai CEM - di opportune modulistiche, che individuino le controindicazioni all'esposizione ai CEM.

Altro rischio che l'RSPP deve gestire è quello dovuto all'ingresso accidentale di oggetti ferromagnetici all'interno dell'area esposta al campo magnetico statico.

Al fine di prevenire ciò è necessario garantire una corretta informazione a tutto il personale che lavora nell'area interessata, così da consentire una applicazione ottimale della strategia prevenzionistica ipotizzata.

³ In *amplius* al par. 9.3.1

Tabella B4

Allegato XXXVI parte II del d.lgs. 159/2016

VA per l'induzione magnetica di campi magnetici statici	
Rischi	VA (B ₀) [mT]
Interferenza con dispositivi impiantabili attivi, ad esempio stimolatori cardiaci	0,5
Rischio di attrazione e propulsivo nel campo periferico di sorgenti ad alta intensità (> 100 mT)	3

Il d.lgs. 159/2016 individua nel valore di azione pari a 3 mT il limite oltre al quale è presente il rischio dovuto all'*effetto proiettile*, ovvero quello dovuto all'accelerazione di un corpo ferromagnetico verso la sorgente magnetica.

In conseguenza di quanto sopra espresso, al fine di ridurre il rischio di cui trattasi, ovvero l'accesso accidentale di oggetti ferromagnetici nelle aree esposte ad un campo magnetico statico pari o superiore a 3 mT, è necessario prevedere misure prevenzionistiche opportune quali ad esempio: cartellonistica restrittiva indicante il fattore di rischio, codifica di procedure di lavoro anche ai fini della sicurezza, formazione, informazione, ecc.

3.2 LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO NEI LABORATORI NMR OSPITANTI SPETTROMETRI AD ALTISSIMO CAMPO

Nei laboratori NMR ospitanti spettrometri ad altissimo campo possono sussistere scenari di possibili esposizioni dei lavoratori al campo magnetico statico molto elevate, opportunamente da valutare caso per caso, in cui il livello potrebbe superare i limiti di legge. Se la pratica lavorativa prevede il temporaneo superamento dei valori limite di esposizione imposti dalla normativa vigente per gli effetti sensoriali (2 tesla) durante il turno di lavoro - giustificato da necessità legate alla pratica o al processo produttivo - il datore di lavoro è tenuto ad effettuare una comunicazione preventiva all'organo di vigilanza territorialmente competente (Dipartimenti di prevenzione delle Asl) indicando nella comunicazione in questione il superamento temporaneo dei valori limite di esposizione relativi agli effetti sensoriali, mediante una relazione tecnico protezionistica.

Tabella A1		Allegato XXXVI parte II del d.lgs. 159/2016	
VLE per induzione magnetica esterna (B0) per frequenze comprese tra 0 e 1 Hz			
		VLE relativi agli effetti sensoriali [T]	
Condizioni di lavoro normali		2	
Esposizione localizzata degli arti		8	
		VLE relativi agli effetti sanitari [T]	
Condizioni di lavoro controllate		8	

La relazione di cui trattasi dovrà contenere tutte le valutazioni e quanto altro atteso dalla norma precedentemente citata, ovvero, in sintesi:

1. il motivo del superamento dell'esposizione dei lavoratori (che dovrà comunque avere natura temporanea e non dovrà mai superare i valori limite di esposizione relativi agli effetti sanitari, ovvero gli 8 tesla) e il numero di lavoratori coinvolti;
2. l'impegno del datore di lavoro a rivalutare lo scenario operativo e aggiornare, se del caso, la valutazione dei rischi e le misure di prevenzione, se i lavoratori dovessero accusare la comparsa di effetti transitori;
3. l'indicazione delle specifiche misure di protezione dei lavoratori adottate, quali ad esempio il controllo dei movimenti;
4. indicazione sulle modalità di trasferimento ai lavoratori delle dovute informazioni preventive correlate a situazioni di rischio nell'ambiente lavorativo in cui sono chiamati ad operare, comprensive delle indicazioni finalizzate a perseguire la messa in atto dei soli comportamenti utili al contenimento delle esposizioni.

Dovranno altresì essere indicate le fonti da cui sono state estrapolate le necessarie informazioni per effettuare le valutazioni in questione, le eventuali misure effettuate e i calcoli alla base dei risultati determinati.

Vale la pena evidenziare che la condizione di possibile esposizione a valori superiori a 2 tesla rappresenta attualmente una situazione estremamente limitata per gli apparecchi NMR installati sul territorio nazionale.

Si ricorda altresì che in genere è possibile limitare le esposizioni ai CEM lavorando in condizioni ottimizzate di sicurezza, ovvero adottando idonee procedure di lavoro e implementando le misure di protezione. Di seguito verranno analizzate le situazioni in cui è possibile creare delle condizioni di ottimizzazione della sicurezza che consentono di ridurre le esposizioni alle sole procedure operative che, per limitazione tecnologica, non possono essere evitate.

Il datore di lavoro è tenuto a codificare delle procedure che garantiscano operativamente che nessuno acceda e stazioni nelle zone ove sussiste il rischio elevato (presenza di un campo magnetico statico > 2 tesla) anche se si tratta di personale autorizzato - e quindi privo di controindicazioni - ad operare all'interno di campi statici sopra i 0,5 mT.

In tali zone, opportunamente identificate mediante specifica segnaletica, qualora l'operatore debba accedervi per motivi di inderogabile necessità legata alla pratica di lavoro, dovranno essere previste procedure operative puntuali finalizzate a ridurre al minimo le esposizioni al campo magnetico statico connesse alla tipologia del movimento dell'operatore all'interno delle aree di lavoro ove tale esposizione è maggiore, se del caso prevedendo condizioni di controllo dei movimenti, in termini di abbassamento sia della velocità traslazionale, e sia della velocità rotazionale, entrambi fattori che possono dare luogo - se non controllati - ad effetti sensoriali a breve termine tali da provocare situazioni incidentali anche piuttosto significative.

Tali situazioni operative, se inderogabili e non ottimizzabili con procedure alternative, sono quelle che dovranno prevedere da parte del datore di lavoro la necessità di dover effettuare la comunicazione preventiva al Dipartimento di prevenzione della Asl territorialmente competente e di cui si è argomentato in precedenza.

Fermo restando quanto sopra, in presenza di rischio, anche qualora l'ottimizzazione della sicurezza permetta l'assenza - nella normale operatività - di esposizione del lavoratore ad un campo magnetico statico > 2 tesla, debbono essere ipotizzate le possibili situazioni emergenziali in cui è possibile che il lavoratore venga indebitamente esposto al campo magnetico statico. In questi casi occorre prevedere che l'evento sia registrato e opportunamente valutato dall'RSPP, comunicando l'accaduto al medico competente per le valutazioni del caso.

3.3 LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO DA CEM NEI LABORATORI NMR: PROPOSTA DI UN MODELLO OPERATIVO

Come già evidenziato, la responsabilità di valutare la presenza di rischi in un ambiente di lavoro è in capo al datore di lavoro.

Spetta ad egli incaricare le figure specifiche richieste dal d.lgs. 81/2008 e s.m.i. per effettuare la valutazione dei rischi e stabilire il livello di attenzione e/o le misure di prevenzione e protezione da intraprendere e la loro corretta gestione nell'ambiente lavorativo di cui trattasi. La valutazione del rischio nel settore NMR è demandata in tutti i casi al servizio di prevenzione e protezione che, a nome del suo responsabile, è tenuto a relazionare al datore di lavoro in merito all'entità del livello di rischio presente e alle misure di garanzia da intraprendere al fine di limitare le esposizioni in applicazione del d.lgs. 81/2008 e s.m.i.

Nell'ambito degli spettrometri NMR la presenza di campo magnetico statico nell'intorno degli spettrometri è senz'altro importante poiché nella maggior parte dei casi si supera il limite di 0,5 mT, che delimita le *zone controllate*.

Pertanto c'è la necessità di redigere una specifica valutazione dei rischi, stilare un elenco dei lavoratori autorizzati, intraprendere misure di sorveglianza sanitaria e codificare procedure di accesso che rappresentano elementi imprescindibili per tutte le installazioni dove è presente un campo statico di 0,5 mT.

Negli spettrometri NMR, ove sussiste anche il rischio di superamento dei 2 tesla (indi-

cato dalla norma come valore limite di esposizione per gli effetti sensoriali), che può avvenire nelle situazioni di avvicinamento allo spettrometro per svolgere operazioni sia dal basso, nella sostituzione del probe, nella regolazione manuale dell'accordo di impedenza (matching) e della sintonia (tuning), che dall'alto, nell'introduzione dei campioni, tali procedure operative, ad eccezione della sostituzione del probe, possono essere ottimizzate al fine di limitare le esposizioni ai CEM. Infatti solamente l'introduzione del probe prevede necessariamente l'avvicinamento di un operatore per il tempo necessario per eseguire tale operazione; in tutti gli altri casi è possibile ottimizzare le procedure al fine di limitare le esposizioni. Le regolazioni di impedenza e sintonia possono essere oggi remotizzate (per tutti gli strumenti moderni e buona parte degli apparecchi di generazioni precedenti) e, quindi, svolte comodamente dalla postazione informatica, mentre l'introduzione dei campioni può essere invece demandata ad un carosello automatizzato. L'implementazione di tali accorgimenti comporta inevitabilmente dei costi aggiuntivi in fase di installazione o di adeguamento in fase successiva, ma sono da considerarsi di fondamentale importanza soprattutto su apparati in cui si riscontra il costante superamento dei limiti imposti dalla norma nella routine lavorativa.

Una corretta valutazione dei rischi, legata alla presenza del campo magnetico statico nel mondo dell'NMR, deve necessariamente tener conto delle caratteristiche costruttive dell'apparecchio e della dispersione del campo intorno allo stesso al fine di individuare: le zone di rischio, i livelli di attenzione da tenere e le procedure operative da seguire per ridurre al minimo le esposizioni e la possibilità che possano instaurarsi scenari di rischio.

Pertanto per una corretta valutazione dei rischi occorre:

1. effettuare l'individuazione della linea di isocampo da 0,5 mT intorno all'apparecchio, al fine di identificare la zona da interdire al libero accesso, rendendo la medesima area accessibile al solo personale autorizzato (indicato in un elenco). La verifica del campo magnetico statico disperso deve essere effettuata anche nelle aree confinanti con il locale sede dell'apparecchio, incluse le aree esterne, quelle sovrastanti e sottostanti;
2. che il datore di lavoro, per il tramite del medico competente, assicuri la sorveglianza sanitaria sul *personale autorizzato anche al fine di individuare i soggetti sensibili alle esposizioni ai CEM, e provveda all'effettuazione di una specifica attività di formazione/informazione di tutti i lavoratori;*
3. individuare i valori di campo magnetico statico in prossimità dell'apparecchio ove l'operatore svolge operazioni di sostituzione del probe, regolazione del matching e del tuning, introduzione dei campioni (quindi al di sotto e al di sopra dello strumento) al fine di individuare il livello di esposizione. Dalle misure rilevate di cui trattasi sono possibili due situazioni a seconda che i valori del campo magnetico statico rilevati in prossimità dell'apparecchio NMR risultano essere:
 - a) inferiori ai limiti imposti dal d.lgs. 81/2008 e s.m.i. per gli effetti sensoriali. In tal caso, in un'ottica di maggior cautela per il lavoratore esposto, è comunque raccomandabile adottare procedure che prevedano la presenza dell'operatore in prossimità dell'apparecchiatura NMR solo per il tempo strettamente necessario

all'attività da svolgere (fermo restando che è comunque auspicabile che le apparecchiature NMR siano dotate dei sistemi remotizzati e dei caroselli di cui si è argomentato in precedenza);

- b)** superiori ai limiti imposti dal d.lgs. 81/2008 e s.m.i. per gli effetti sensoriali. In tal caso è fortemente raccomandato l'adozione di sistemi di remotizzazione e automazione per l'introduzione e rimozione dei campioni. Per le operazioni di sostituzione del probe e per qualsiasi altra operazione che richieda l'intervento indelegabile degli operatori in prossimità dello spettrometro, occorre effettuare la comunicazione preventiva all'Asl territorialmente competente secondo quanto stabilito dal d.lgs. 81/2008 e s.m.i. Nel merito operativo occorre codificare puntuali procedure al fine di ridurre al minimo il tempo di esposizione e il movimento dell'operatore all'interno del campo statico in prossimità dello strumento garantendo che il carattere di esposizione sia comunque solo temporaneo.

È auspicabile che per gli spettrometri ove sussiste anche il rischio di superamento dei 2 tesla, in cui dovessero sussistere le condizioni di maggiore esposizione individuate dal punto precedente, la valutazione del rischio sia effettuata da personale particolarmente competente che abbia dimestichezza con la gestione del rischio in tali ambienti di lavoro. In Italia attualmente la figura che negli ultimi anni ha acquisito la maggiore esperienza in questo settore è senz'altro quella dell'esperto responsabile per la sicurezza, che opera nel settore medico della risonanza magnetica secondo quanto stabilito dal d.m. salute 10/08/2018⁴.

L'espletamento di misure sperimentali del campo magnetico statico disperso è sempre necessario in tutte le installazioni al fine di individuare le zone esposte a valori non inferiori a 0,5 mT. Infatti, pur avendo a disposizione la mappatura del campo magnetico statico disperso intorno allo strumento fornita dalla sua ditta produttrice, l'espletamento di misure in loco permette di stabilire le aree effettivamente interessate rispetto al contesto in cui lo stesso strumento è stato inserito. Condizioni al contorno infatti possono delineare spostamenti del campo o modifiche dello stesso rispetto a quanto indicato nei manuali, che fanno riferimento alla situazione ideale in totale ambiente libero.

Premesso quanto sopra, inoltre il livello di attenzione nei siti NMR ospitanti spettrometri ad alto campo deve anche tenere conto del fatto se - da parte dei lavoratori coinvolti - vengano riferiti effetti sensoriali connessi a situazioni operative ordinarie.

⁴ Cfr. Sez. E dell'Allegato 1 al d.m. salute 10/08/2018. La figura dell'esperto responsabile per la sicurezza, precedentemente al d.m. salute 10/08/2018, era già stata introdotta nell'ordinamento nazionale dal d.m. sanità 02/08/1991.

4. INDICAZIONI OPERATIVE DI CARATTERE GENERALE PER LA GESTIONE DELLA SICUREZZA NEI LABORATORI NMR

Oltre alla totale assenza di un quadro normativo tecnico di riferimento, va anche rilevato come, a differenza delle applicazioni della risonanza magnetica in medicina, nel caso oggetto del presente lavoro non esista neanche una regolamentazione di carattere autorizzativo che, di fatto, obblighi l'utenza ad una preliminare valutazione del rischio da sottoporre al vaglio di una qualsivoglia autorità competente.

Da questa valutazione preliminare, nasce l'idea della *Sezione supporto al servizio nazionale in materia di radiazioni* dell'Inail, avente lunga tradizione nella gestione del rischio nell'utilizzo delle tecnologie di imaging medico, di proporre dei requisiti minimi per la messa in sicurezza degli ambienti e la garanzia dell'incolumità per tutti gli operatori coinvolti, anche eventualmente finalizzati all'elaborazione di modelli di autovalutazione, che i datori di lavoro potranno virtuosamente utilizzare per valutare le situazioni poste in essere.

4.1 GLI SPECIALISTI DEL RISCHIO

È bene ricordare che sono compiti del datore di lavoro:

- incaricare il personale idoneo per effettuare la valutazione del rischio all'interno del laboratorio NMR e stabilire le modalità per una corretta gestione delle attività;
- istituire ed aggiornare un elenco del personale autorizzato, che presta abitualmente servizio presso il laboratorio NMR;
- garantire che i lavoratori operanti nelle zone controllate posseggano l'idoneità sanitaria specifica alla mansione specifica, rispettando le periodicità dei controlli sanitari stabilite dal medico competente nel rispetto della vigente normativa in materia;
- garantire il confinamento di tutte le aree di rischio, impedendone il libero accesso;
- garantire mediante opportune cartellonistiche la segnalazione delle aree di rischio e, attraverso l'emanazione di procedure codificate, le modalità di accesso per tutti coloro che non lavorano abitualmente nel laboratorio;
- istituire un registro degli incidenti/mancati incidenti sulla base dei quali rivalutare periodicamente l'appropriatezza delle misure di protezione intraprese.

In realtà, negli impianti di risonanza magnetica ad uso medico, la specificità delle questioni in essere ha fatto determinare una figura specifica per effettuare la valutazione del rischio, già menzionata precedentemente, che si chiama esperto responsabile per la sicurezza, e che di fatto è tenuto ad operare al posto dell'RSPP o di altro tecnico qua-

lificato incaricato dal datore di lavoro di predisporre la relazione tecnica di valutazione del rischio NMR. Ove la valutazione del rischio effettuata in un laboratorio NMR porti - nei suoi esiti - a suggerire la traslazione del modello sanitario, di seguito vengono codificate quelle possibili figure professionali specialistiche che affianchino l'RSPP, potendosi evidentemente considerare *personale qualificato* anche per gli aspetti correlati all'applicazione del d.lgs. 159/2016. Successivamente, si introdurrà invece un modello *semplificato* di proposta per una corretta gestione del rischio ove non sono riportati espliciti riferimenti a figure specialistiche. In entrambi i casi, risulta comunque determinante che ogni laboratorio NMR preveda un modello organizzativo che garantisca massima competenza ed estrema puntualità di intervento.

4.1.1 Il responsabile impianto e procedure di utilizzo in ambito NMR (RIPU)

Tale figura deve avere competenze ed esperienze professionali (comprovato da un dettagliato curriculum vitae) riguardo all'utilizzo dello spettrometro NMR. Questa figura, designata dal datore di lavoro con formale lettera d'incarico e relativa accettazione, ha delega nella definizione di procedure operative e gestionali legate all'uso dello spettrometro NMR che mettano in atto le regole di sicurezza stabilite dalla figura professionale specialistica definita nel paragrafo che segue. Il RIPU è di fatto una figura tecnica che ha esperienza nell'utilizzo dello spettrometro NMR, e che utilizza tale spettrometro nella quotidianità professionale.

4.1.2 L'esperto responsabile per la gestione degli aspetti di sicurezza (ERGAS)

L'ERGAS, formalmente incaricato dal datore di lavoro, è incaricato di elaborare, avvalendosi delle competenze e delle indicazioni del RIPU, un 'regolamento di sicurezza', nel quale inserire i protocolli comportamentali riferiti a tutte le procedure operative e gestionali del laboratorio NMR che abbiano un qualche tipo di riscontro in termini di gestione della sicurezza: 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 di incidente. L'ERGAS è chiamato a garantire aspetti e requisiti di sicurezza analogamente a quanto previsto per l'esperto responsabile per la sicurezza dal d.m. salute 10/08/2018, per le apparecchiature RM impiegate a scopo medico. 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, che viene emesso dal datore di lavoro e deve essere rispettato da tutto il personale autorizzato.

È importante che l'incarico venga affidato a soggetti che, in virtù delle loro caratteristiche curriculari, abbiano esperienza documentata, o nella sicurezza riferita alla tomografia RM in campo medico, o nella valutazione dell'esposizione ai rischi da campi elettromagnetici, eventualmente acquisita attraverso la partecipazione a corsi di formazione organizzati dalle regioni, dalle associazioni scientifiche di settore, o da autorità competenti, in ciò ricomprendendo anche quelli organizzati nel passato dall'IspeS, e successivamente al 2010, dall'Inail.

Al fine di identificare i criteri, riguardo ai titoli di preferenza per l'acquisizione dell'incarico, sarebbe auspicabile, per analogia, utilizzare quelli vigenti per l'ambito medico ai sensi del d.m. salute 10/08/2018.

L'ERGAS è preferibilmente tenuto a istituire un registro contenente tutti i controlli di sicurezza nel tempo espletati, che il datore di lavoro è tenuto a conservare.

4.2 LA CLASSIFICAZIONE DELLE ZONE DI RISCHIO

Fermo restando che nella panoramica di cui alla Figura 9, è possibile riscontrare gli ambienti che tipicamente connotano un laboratorio NMR, i successivi paragrafi consentiranno di ottimizzare l'allocazione delle apparecchiature.



Immagine scattata in un laboratorio NMR dell'Istituto di biochimica molecolare dell'Università di Sassari

4.2.1 Zona controllata

La zona controllata, ovvero quella in cui il campo disperso d'induzione magnetica è pari ad almeno 0,5 mT (5 G), è l'area nella quale è presente un rischio fisico reale. Nella diagnostica medica è stata codificata la zona ad accesso controllato come un'area confinata, contenente la zona controllata, dimensionalmente molto meno estesa della prima, accessibile solo previo consenso attraverso un varco normalmente chiuso e non apribile liberamente. Questo approccio resta cautelativamente - e di gran lunga - il più valido, anche al di fuori dell'ambito medico, e al perseguimento del medesimo si invitano i datori di lavori e gli RSPP a contribuire, in quanto tale misura consente una vera ottimizzazione della sicurezza. Nei casi in cui, però, gli esiti della valutazione del rischio o la tipologia di laboratorio NMR suggerissero la possibilità di percorrere soluzioni alternative tecnicamente meno impegnative della realizzazione di un varco controllato, perché magari non tecnicamente realizzabile, è possibile ipotizzarle che approssimino - in difetto - il raggiungimento dello standard di sicurezza auspicato, ma che comunque migliorino la situazione pregressa. In particolare, in questa proposta alternativa che di

seguito si connota nei suoi tratti più salienti, la zona controllata, ovvero quella in cui il campo disperso d'induzione magnetica è pari ad almeno 0.5 mT (5 G), deve essere segnalata (si suggerisce in rosso) con grande chiarezza e delimitata con barriere fisiche mobili di altezza limitata, e che scorraggino il libero accesso senza impedire la vista dell'apparecchiatura. A tale misura, che va messa in pratica solo nel momento in cui la realizzazione di una barriera fisica fissa - prevista dal modello sanitario - venisse considerata misura non praticabile⁵, deve accompagnarsi una ulteriore disposizione, ovvero quella di segnalare cromaticamente a terra le due linee isomagnetiche corrispondenti a valori di campo magnetico statico crescente, da 0.3 (si suggerisce in verde) e da 0.4 mT (si suggerisce in giallo), così da rendere percepibile in modo graduato il livello di rischio crescente presente nell'ambiente. La codifica dei criteri di accessibilità alle varie zone, nonché i criteri per l'utilizzo di qualsivoglia dispositivo o di determinati apparati elettronici nelle une piuttosto che nella altre, è materia che deve trovare trattazione nel regolamento di sicurezza del laboratorio NMR: relativa *legenda* e segnaletiche di avviso vanno affissi sulla porta di accesso del laboratorio - che comunque andrà tenuta sempre rigorosamente chiusa, a chiave nel caso non ci sia nessuno al suo interno - ma anche sulle pareti internamente al medesimo.

Eventuali ambienti esterni al laboratorio NMR, interessati da uno sconfinamento della zona controllata (vedi Figura 10), dovrebbero essere analogamente gestiti in riferimento alla segnalazione sia delle aree controllate, e sia di quelle immediatamente ad esse limitrofe, secondo il principio di gradualità cromatica sopra introdotto.

Sia nel caso di accesso controllato, e sia nel caso della soluzione alternativa di cui sopra, all'ingresso del laboratorio NMR dovrà essere prevista la segnaletica di rischio, da mutuare dall'ambito medico.

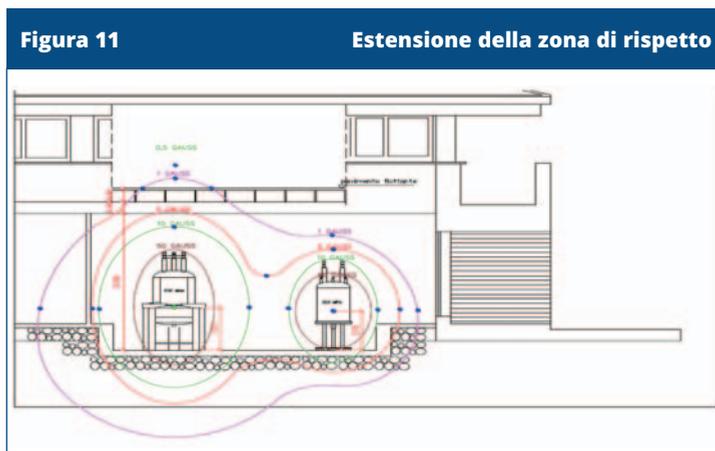
⁵ La soluzione ottimale per il filtro degli accessi prevedrebbe che i laboratori NMR siano dotati di barriere fisiche fisse per l'accesso, ovvero porte liberamente apribili solo dall'interno (ad esempio con apertura a chiave, a comando elettromeccanico, a banda magnetica, a combinatore numerico, ad impronta digitale, ecc.). Tutti gli accessi dovrebbero in questo caso 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 dovrebbero certamente essere interdette al libero passaggio con ulteriori barriere fisiche fisse dotate di dispositivo di apertura e di possibile accesso al solo personale autorizzato.



Immagini tratte dai libretti di istruzioni di spettrometri NMR Bruker

4.2.2 Zona di rispetto

Si definisce zona di rispetto (vedi Figura 11) l'area interessata da valori di campo disperso d'induzione magnetica, compresi tra 0.1 mT (1 G) e 0.5 mT (5 G); al di sotto dei 0.1 mT il campo in questione si considera come fondo ambientale. Essa non necessariamente dovrà essere contenuta tutta all'interno del laboratorio NMR, ma è buona prassi che sia segnalata cromaticamente nella sua porzione più vicina alla sala magnete, onde consentire la percezione della gradualità del rischio. Non ci sono evidenze scientifiche che suggeriscano la necessità di evitare che operatori possano sostare in zona di rispetto.



Immagini tratte dai libretti di istruzioni di spettrometri NMR Bruker

Ferma restando la necessità di 'mappare', anche visivamente, le zone di rischio intorno allo spettrometro (vedi Figura 12), 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.

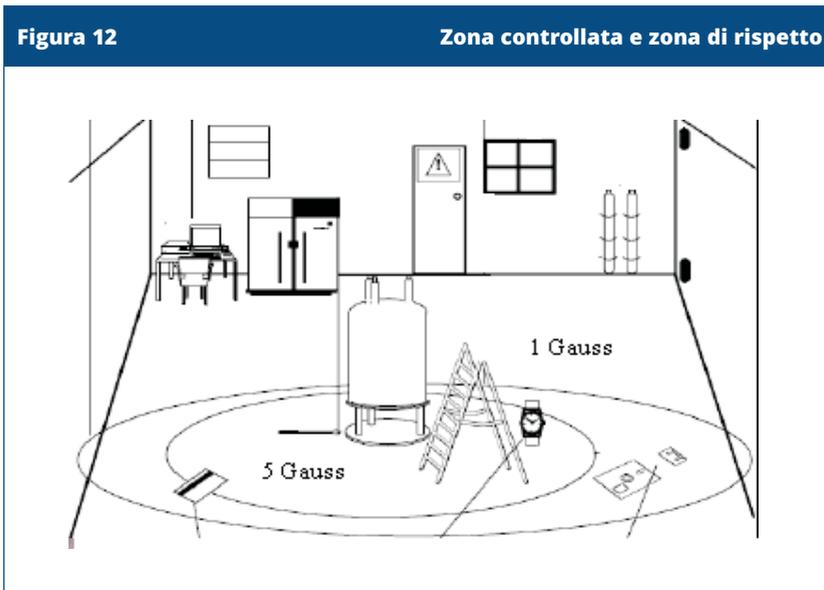


Immagine tratte dai libretti di istruzioni di spettrometri NMR Bruker

Da notare che mentre gli spettrometri più piccoli non necessitano di scale o altri accorgimenti per salire sulla loro torretta, gli spettrometri di medie dimensioni richiedono l'ausilio di scale amovibili, e per gli spettrometri più grandi è generalmente prevista persino la realizzazione di veri e propri palchetti (realizzati con materiale amagnetico) a livello della testa del magnete, cui si accede con l'ausilio di una scala fissa all'uopo realizzata (vedi Figura 13).

Figura 13 La necessità di realizzare dei palchetti è legata alla grandezza degli spettrometri e quindi all'accessibilità alla testa del magnete



Immagini tratte dai manuali di istruzione di spettrometri NMR Bruker

Anche negli spettrometri più grandi, se le operazioni di tuning non sono remotizzate, esse devono essere effettuate accedendo alla parte inferiore del magnete, ove l'operatore si ritrova implicitamente immerso in un campo che in tale zona è evidentemente più elevato.

4.3 IL PERSONALE AUTORIZZATO AD OPERARE IN ZONA CONTROLLATA

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 alme-

no 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, ecc.; 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 *occasional* 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 quella 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.

4.4 ATTENZIONI PARTICOLARI RELATIVE ALL'INTRODUZIONE DI MATERIALE FERROMAGNETICO NEL LABORATORIO NMR

Ogni singolo oggetto che è introdotto ed utilizzato nella zona controllata interna al laboratorio NMR deve essere compatibile con il campo magnetico al fine di non incorrere nell'effetto missile di attrazione verso il magnete, cosa che comporterebbe l'instaurarsi di scenari di rischio significativi.

A tale proposito dovrà essere stilata un'opportuna procedura, all'interno del regolamento di sicurezza, che preveda una verifica di compatibilità di qualsiasi oggetto o materiale prima di essere introdotto all'interno al laboratorio NMR, prevedendo eventualmente la dotazione di un metal detector (portatile) per verificare la presenza di materiali metallici e di una semplice calamita per verificare se essi siano ferromagnetici.

È probabile che alcuni dispositivi non compatibili con il campo magnetico possano essere necessari all'interno del laboratorio; in questo caso la loro presenza dovrà essere concordata con il RIPU, autorizzata dall'ERGAS e prevedere opportune procedure di lavoro.

Tutti gli oggetti dovranno essere etichettati ed il loro utilizzo dovrà essere codificato da una procedura operativa contenuta nel regolamento di sicurezza.

In analogia con la normativa prevenzionistica applicata alle installazioni con tomografi RM ad uso medico diagnostico, è opportuno - proprio al fine di minimizzare il rischio di incidente correlato all'*effetto proiettile* - che tutta la strumentazione amovibile presente nel laboratorio NMR sia etichettata in modo da rendere evidente l'eventuale compatibilità con l'esposizione al campo magnetico statico, in ossequio a quanto previsto dalla norma armonizzata CEI EN 62570:2016-01 '*Pratiche standard per la marcatura di sicurezza di dispositivi medici e altri oggetti in ambiente di risonanza magnetica*', che recepisce integralmente la norma ASTM F2503-13.

Nella normativa citata sono definite, in particolare, tre differenti modalità di etichettatura:

- **MR-safe:** *il dispositivo non comporta alcun tipo di rischio in ogni possibile condizione in ambiente ove sia presente un'apparecchiatura di risonanza magnetica. Un dispositivo MR-safe è costituito da materiali elettricamente non conduttivi, non metallici e non magnetici* (Etichetta 1);
- **MR-conditional:** *il dispositivo ha dimostrato di non porre rischi reali in ambiente ove sia presente un'apparecchiatura di risonanza magnetica solo se sottoposto a specifiche condizioni di utilizzo in termini intensità del campo magnetico e del gradiente spaziale* (Etichetta 2);
- **MR-unsafe:** *il dispositivo è del tutto incompatibile con la sua introduzione in ambiente ove sia presente un'apparecchiatura di risonanza magnetica* (Etichetta 3).



Immagini tratte dal d.m. salute 10/08/2018

5. SOLUZIONI DI SICUREZZA OTTIMALI IN RELAZIONE AGLI IMPIANTI

Le seguenti indicazioni sono raccomandate per tutti gli impianti in cui sono presenti ingenti quantitativi di elio liquido all'interno degli spettrometri NMR (100 - 1000 litri), ovvero potenzialmente in grado di saturare - in caso di incidente che coinvolga gli ambienti interni - il volume del laboratorio oltre i livelli massimi previsti dal modello semplificato (a seguito riportato).

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 sgombro 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 superconduttività della bobina con un improvviso surriscaldamento e caduta del campo. Questo evento provoca la vaporizzazione dell'elio e/o dell'azoto (dipende dai sistemi): per ovvie ragioni di 'peso', l'elio si stratifica verso l'alto e l'azoto verso il basso, ed è per questi motivi che 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, ecc.). 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.

Nel caso di utilizzo di elio, per il quale sussiste invece il rischio di quench, occorre senz'altro prendere come riferimento quanto contenuto nel d.m. salute 10/08/2018 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 sistema di sicurezza totalmente efficace, dovrebbe quindi 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 almeno 6 ricambi/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 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. Un sistema di ventilazione di emergenza: 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 ricambi/h). Tale impianto può essere realizzato in due modi.
- a) Affiancando al sistema ordinario di mandata/ripresa (6 ricambi/h) un sistema ausiliario di ulteriore mandata ed ulteriore estrazione con motori autonomi, in modo tale da raggiungere, compresa la ventilazione ordinaria, i 18 ricambi/h.
 - b) Mettendo motori di mandata/ripresa a 2 velocità (quali i sistemi ad inverter); il primo con portata 6 ricambi/h e il secondo per arrivare ai 18 ricambi/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. È possibile prevedere sulla sommità del magnete una *cappa* di convogliamento dell'elio in una condotta di ripresa.
- 2 bis** Un eventuale secondo sistema di emergenza nel caso venga previsto anche l'utilizzo di azoto, destinato all'evacuazione delle fuoriuscite del medesimo, 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 almeno 18 ricambi/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 mandata 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 d.m. sviluppo economico 37/2008 e s.m.i., in altre parole - per gli stessi impianti - dovranno essere prodotti, dalle ditte fornitrici/installatrici ai rispettivi committenti, gli allegati tecnici obbligatori previsti nella certificazione, che a sua volta saranno messi a disposizione dell'ERGAS per le valutazioni tecniche di merito, riguardo 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 per la rilevazione del tenore di ossigeno in ambiente, atti alla rilevazione dell'eventuale depauperamento dovuto alla fuoriuscita dell'elio o dell'azoto, con associati a ciascuno di essi due livelli di intervento: un preallarme ed un allarme al raggiungimento di una concentrazione di O₂ rispettivamente pari al 19% ed al 18%: l'allarme attiverà automaticamente una delle due ventilazioni di emergenza, a seconda del gas rilevato (ovvero del loro posizionamento). Più precisamente il sensore:
 - in alto rileverà l'elio, e pertanto attiverà la mandata di emergenza comune, e la ripresa di emergenza in alto;
 - in basso rileverà l'azoto e pertanto attiverà la mandata di emergenza comune, e 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 sensore

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.

Nel caso sia presente la cavità accessibile sotto il magnete (vedi Figura 14), occorrerebbe valutare l'eventuale ottimizzazione nell'allocazione del sensore utile a rilevare le fughe di azoto (da porre, per esempio, a 30 cm dal fondo della cavità stessa).

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.

Figura 14**Spettrometro con cavità sottostante accessibile**

Immagine tratte dai libretti di istruzioni di spettrometri NMR Bruker

4. Una (o più, se necessario) linea di evacuazione dell'elio gassoso, realizzata per convogliare e disperdere i gas creatisi a seguito di un eventuale quench, deve essere allocata in accoppiamento all'apparecchiatura NMR; il suo terminale deve essere realizzato in modo da non far entrare acqua piovana, dotato di retina antintrusione, e tali da garantire nel proprio interno, eventualmente per il tramite di opportune delimitazioni, una zona di rispetto per il sistema naso-bocca più vicino pari ad almeno 4 metri, in accordo con le indicazioni operative Inail 2015 per l'ambito medico. 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 contenitori 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 d.m. sviluppo economico 37/2008 e s.m.i., 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 labo-

ratorio, 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'uso 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.

5. Display di visualizzazione e monitoraggio in continuo del tenore di ossigeno nel laboratorio NMR, identificati mediante etichetta inamovibile, da allocare in prossimità della postazione di lavoro o, se esterna, dell'accesso al laboratorio. Devono essere installati e connessi al sensore da allocare nel punto più favorevole ad una pronta individuazione dell'eventuale depauperamento dell'ossigeno all'interno del laboratorio (vedi Figure 15 e 16);

Figura 15

Particolare del sensore di ossigeno posto a soffitto



Foto scattata presso un laboratorio NMR del CNR di Sassari

6. Sistemi di monitoraggio della temperatura e dell'umidità relativa caratterizzanti il laboratorio NMR, devono essere allocati in prossimità della postazione di lavoro o, se esterna al laboratorio, nelle immediate vicinanze al suo accesso. A meno di specifiche prescrizioni alternative motivate e consentite dal libretto di istruzioni dello spettrometro, dovranno attestarsi a $22\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ di temperatura, e a valori inferiori al 60% di umidità al fine di garantire l'ottimale funzionamento delle apparecchiature e il benessere dei lavoratori.

7. Pulsanti di sicurezza per
- l'attivazione manuale delle ventilazioni di emergenza (vedi ancora Figura 16);
 - lo spegnimento dell'elettronica associata al magnete;
 - il distacco della corrente elettrica generale del laboratorio.

Da allocare in prossimità degli stessi display di visualizzazione e controllo del tenore di ossigeno nel laboratorio NMR ciascun display e ciascun pulsante di sicurezza dovrà essere chiaramente identificato con etichettatura inamovibile.

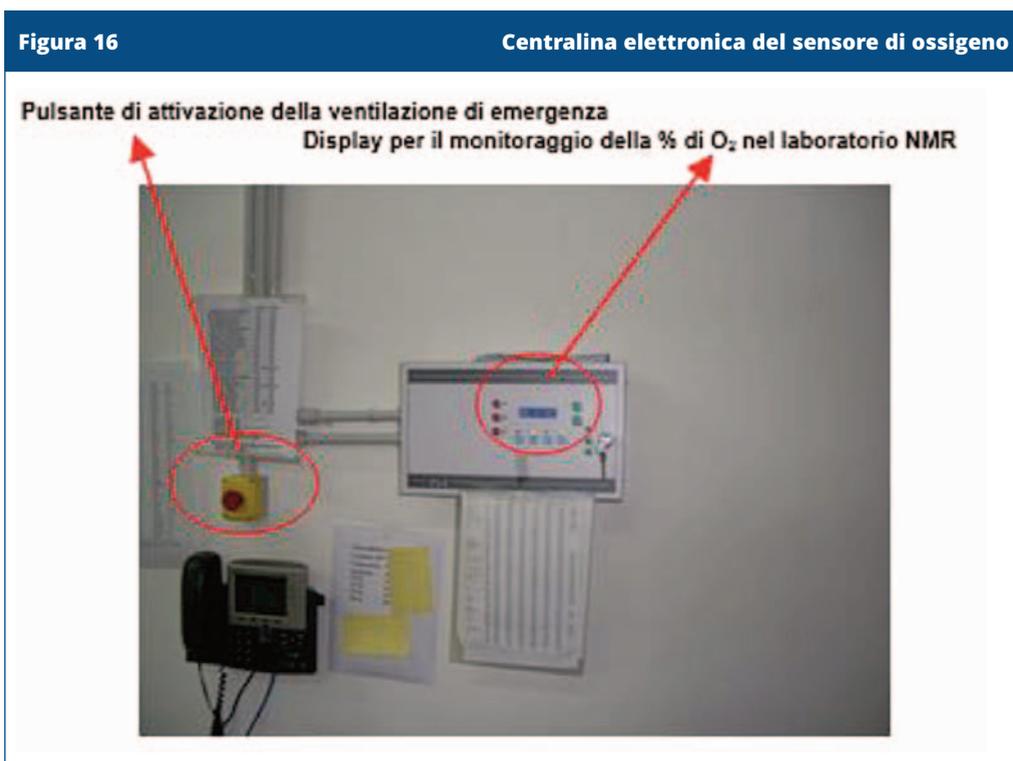


Foto scattata presso un laboratorio NMR del CNR di Sassari

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

apporte 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.

5.1 LE TUBAZIONI DI QUENCH PER L'EVACUAZIONE DELL'ELIO NEGLI SPETTROMETRI NMR

Tubazioni di quench per l'elio sono assolutamente da prevedere, secondo quanto riportato nei libretti di istruzione delle apparecchiature prodotte dalle principali case costruttrici, nei casi in cui i laboratori che devono ospitare gli spettrometri abbiano piccole dimensioni e/o soffitti di altezza non elevata e quando i quantitativi di elio nelle apparecchiature siano considerevoli.

Le tubazioni sono pertanto da considerarsi non come accessorio discrezionale, ma come una dotazione essenziale, ai fini della sicurezza dell'apparecchiatura, prevista dal costruttore. Quest'ultimo può garantirla per ogni tipologia di installazione, soprattutto per quelle di recente e nuova generazione ad elevati contenuti di elio. La realizzazione di tubazioni di quench può essere messa in atto anche a posteriori, a prescindere dall'esistenza o meno di un vincolo di legge, per quanto sopra esposto. Per questo motivo è sempre consigliabile una sua installazione su ogni spettrometro NMR. Tale raccomandazione diventa ancora più importante nei casi esplicitamente raccomandati dai costruttori, cioè relativi a connotazioni strutturali del tipo di quelle già evidenziate.

Nella Figura 17 che segue sono illustrati spettrometri dotati di sistemi di evacuazione realizzati con tubazioni di quench flessibili. Da notare come tale soluzione implichi un'impiantistica di semplice realizzazione, costi decisamente contenuti ed ampia fattibilità per tutti i tipi di installazioni. Il collegamento del tubo con l'apparecchiatura NMR dipende, in genere, specificatamente dalla casa produttrice e dal modello di quest'ultima, che può prevedere a sua volta una o più tubazioni.

Figura 17 Attacco della tubazione di quench allo spettrometro NMR



Foto scattata presso un laboratorio NMR del CNR di Sassari

Per quanto riguarda l'azoto, si è già detto come, per sua natura, non presentando quella prossimità fra temperatura di fusione e temperatura di evaporazione tipica dell'elio, non presenta elevato rischio di quenching e, quindi, non è considerato di critica gestione in termini di sicurezza.

Ciò comporta, anche da parte dei costruttori, la tendenza ad avere un livello di attenzione più basso rispetto all'elio; tuttavia vale la pena ribadire che è auspicabile, vista l'assoluta fattibilità, dotare le torrette dell'azoto di opportuna tubazione di evacuazione all'esterno, evitando così che le esalazioni avvengano all'interno del laboratorio NMR. Quanto argomentato si tratta di un'ottimizzazione fattibile nella maggior parte dei casi e certamente importante negli spettrometri a maggiore contenuto di questo criogeno.

5.2 L'UTILIZZO DI SISTEMI DI ANALISI AUTOMATIZZATI

Nei laboratori di analisi e ricerca NMR in cui è richiesto l'esame di un numero considerevole di campioni, è consigliabile l'installazione di caroselli automatizzati (vedi Figura 18) per l'introduzione del campione, al fine di limitare le esposizioni dei lavoratori addetti, che con tale sistema dovranno soltanto effettuare le operazioni di riempimento e rimozione dei campioni dal carosello ad ogni sessione di lavoro.



Foto scattata presso un laboratorio NMR del CNR di Sassari

6. LIMITAZIONE DELLE ESPOSIZIONI DURANTE LE OPERAZIONI DI TUNING

Le operazioni di tuning sono essenziali per ottenere un buon rapporto segnale-rumore e per particolari scenari applicativi (come ad esempio l'NMR multidimensionale).

Le condizioni di sintonia possono cambiare considerevolmente a seconda del solvente in cui è disciolto il campione e, per quanto riguarda i campioni allo stato solido, in funzione del fattore di riempimento della bobina e del dia/para - magnetismo del campione stesso.

Il processo di sintonizzazione richiede l'aggiustamento di due condensatori variabili per ogni canale nucleare, uno dei quali (tuning) accorda il circuito alla particolare frequenza di risonanza, mentre l'altro (matching) realizza l'adattamento della linea a 50 ohm.

In ogni caso, per ragioni costruttive, i due condensatori sono mutuamente interagenti e richiedono aggiustamenti successivi.

Le condizioni ottimali di sintonia (tuning+matching) possono essere ottenute seguendo almeno tre diverse procedure:

1. utilizzando un riflettometro (reflection meter);
2. utilizzando un ponte a RF ed un oscilloscopio;
3. utilizzando un generatore a frequenza variabile (wobbling generator).

La terza modalità è quella comunemente adottata in tutti i moderni spettrometri che oggi sono generalmente utilizzati.

L'uso di un generatore a frequenza variabile consente anche di ottenere una informazione sulla simmetria della dipendenza della sintonia dalla frequenza.

Nei moderni spettrometri questa funzione è programmata direttamente nel software della macchina, e consente di seguire direttamente il processo sullo schermo del computer.

L'utente deve pertanto far coincidere il punto più basso della curva di Wobble con la frequenza di Larmor di interesse, al fine di ottenere la condizione di sintonia ottimale. Le operazioni di tuning per gli spettrometri NMR prevedono pertanto che l'operatore effettui delle regolazioni alla base del magnete, necessariamente ponendosi vicinissimo allo stesso, all'interno del campo più elevato presente intorno al magnete. Tale operazione, per le motivazioni già espresse, è da ripetersi per ogni tipologia di campioni esaminati e, pertanto, nelle attività di ricerca piuttosto che in quelle di analisi routinaria, in modo molto frequente.

Per effettuare le regolazioni di allineamento del punto più basso della curva di Wobble con la frequenza di Larmor di interesse, l'operatore ha bisogno di interfacciarsi con un monitor ove può verificare l'esito delle manovre effettuate fino al termine dell'allineamento.

Tale procedura comporta nella maggior parte delle installazioni che non prevedono la remotizzazione delle regolazioni, la necessità di spostarsi più volte dalla console allo spettrometro e viceversa. Attualmente, soprattutto per gli spettrometri più potenti, sono disponibili sistemi di regolazione remotizzati, ovvero posizionabili lontano dal magnete e dalla zona di rischio intorno allo stesso.

Tale importante innovazione da parte delle case costruttrici, finalizzata alla sicurezza degli operatori, permette di limitare con un semplice accorgimento le esposizioni dei lavoratori addetti a tali operazioni. È auspicabile che nell'acquisizione di nuovi spettrometri sia sempre privilegiata l'opzione del controllo remoto del tuning e del matching. I movimenti di traslazione e rotazione degli operatori all'interno del campo magnetico sono oggi al centro di molti studi nelle esposizioni dei lavoratori addetti alla risonanza magnetica in medicina e stanno producendo interessanti risultati in merito alle correnti indotte nell'organismo e agli effetti che da esse ne possono derivare sull'uomo. Pertanto dotare la base dello spettrometro, o le sue immediate vicinanze, di un monitor che ripeta le informazioni visive della curva di Wobble consentirebbe quantomeno all'operatore di iniziare e completare la procedura di tuning condensando le operazioni in un unico spostamento, accorciando i tempi di esposizione e limitando al minimo i propri movimenti all'interno del campo magnetico.

7. APPROCCIO SEMPLIFICATO ALLA VALUTAZIONE DEL RISCHIO PER GLI SPETTROMETRI NMR PRIVI DI IMPIANTI DI EVACUAZIONE PER GAS CRIOGENI

La valutazione del rischio legata alla presenza dei gas criogeni all'interno degli spettrometri NMR deve tener conto, oltre che al loro quantitativo e alla presenza o meno dei dispositivi di sicurezza citati precedentemente, del volume e della morfologia della sala ove il medesimo spettrometro è installato e dell'ipotetico tempo di permanenza dell'operatore durante un eventuale fenomeno di quench. Infatti molte installazioni di apparecchiature NMR avvengono, per motivi di opportunità o per limitati spazi a disposizione, in stanze di piccole dimensioni con all'interno allocata anche una postazione di lavoro da utilizzarsi per le operazioni di messa a punto dello spettrometro RM prima di eseguire le analisi.

Appare quindi evidente che, all'interno dei locali con piccole volumetrie, tipicamente caratterizzate da soffitti bassi, il rischio associato alla fuoriuscita di gas criogeni presenti all'interno dello spettrometro in ragione di un eventuale quench dell'apparecchiatura (che può avvenire anche spontaneamente) può essere considerato significativo, poiché in essi la saturazione dell'ambiente da parte del criogeno - per il tramite di stratificazioni successive dall'alto verso il basso - avviene evidentemente in tempi brevi.

La proposta che segue indica un criterio per stabilire se è possibile valutare una ipotesi alternativa all'installazione della tubazione di quench che consenta lo sfogo del gas criogenico in ambiente esterno e che potrebbe essere particolarmente utile nel caso di installazioni datate e che strutturalmente mal si prestano all'installazione di una tubazione di quench realizzata alla regola d'arte. La proposta tiene conto di:

1. quantità di elio contenuta nello spettrometro NMR;
2. presunta permanenza degli operatori in sala durante il quench;
3. volumetria e morfologia della sala ove è installata l'apparecchiatura NMR.

Il criterio in questione, partendo dal concetto - definito successivamente - di *polmone di sicurezza*, cerca di individuare il volume minimo del laboratorio NMR necessario affinché una eventuale fuoriuscita di elio possa espandersi all'interno del laboratorio medesimo, comunque non pregiudicando la possibilità, per gli operatori presenti, di un allontanamento in sicurezza, se del caso accompagnato dall'eventuale attivazione di dispositivi di sicurezza attivi quale l'aspirazione forzata di emergenza, o più semplicemente dall'apertura delle finestre allocate nel locale al fine di consentire l'espulsione del gas sviluppato all'esterno.

La condizione di *polmone di sicurezza* si verifica se la stanza permette l'accumulo temporaneo dell'elio gassoso fuoriuscito senza compromettere l'incolumità degli operatori eventualmente presenti all'interno del laboratorio.

Viene quindi definito quale *polmone di sicurezza* il volume del laboratorio che ospita lo spettrometro NMR, uguale al volume totale di elio che si sviluppa in caso di quench a cui viene sommato un *volume di sicurezza* che garantisca l'incolumità del lavoratore. Per calcolare il *polmone di sicurezza* si utilizza quindi la seguente formula:

$$P_s = V_s + V_{\text{He gas}} = 2 \cdot S_{\text{sala}} + 750 \cdot V_{\text{He liq}} \text{ [m}^3\text{]}$$

dove:

$V_s = 2 \cdot S_{\text{sala}}$ è la porzione di volume di sicurezza;

$V_{\text{He gas}} = 750 \cdot V_{\text{He liq}}$ è la porzione di volume della sala riempita dall'elio gassoso al termine da un fenomeno di quench, che coinvolga tutto l'elio liquido inizialmente presente nell'apparecchiatura.

Di fatto, il *polmone di sicurezza* rappresenta il volume minimo che dovrebbe avere la sala ospitante lo spettrometro NMR affinché - in caso di quench - la stratificazione dall'alto verso il basso dell'elio gassoso al suo interno non raggiunga la zona naso-bocca del lavoratore (che in genere si considera cautelativamente pari ad una altezza pari a 2 m), ovvero che permetta l'incolumità del lavoratore presente durante tutto il tempo in cui si verifica il quench. Si può altresì ipotizzare un modello che tenga conto del reale volume di elio fuoriuscito dallo spettrometro dall'inizio del quench all'evacuazione della sala da parte degli operatori, che chiameremo *polmone di sicurezza ponderato*, con $P_{sp} \leq P_s$; supponendo che, in caso di quench, il personale possa lasciare la sala ospitante l'apparecchiatura NMR in un tempo t_p , e che il tempo di svuotamento dell'apparecchiatura sia pari a t_q^6 , con $t_p \leq t_q$:

$$P_{sp} = 2 \cdot S_{\text{sala}} + 750 \cdot V_{\text{He Liq}} \cdot (t_p / t_q) \text{ [m}^3\text{]}$$

Si può quindi affermare che la sala ospitante lo spettrometro RM è sicura, in caso di quench, se il suo volume non è inferiore al *polmone di sicurezza ponderato*, ovvero se:

$$V_{\text{sala}} \geq P_{sp}$$

La valutazione del tempo di permanenza t_p all'interno della sala durante un quench (ovvero il tempo necessario per l'evacuazione della sala durante il quench) spetta all'ERGAS, se presente nella struttura, o al RSPP; essa deve tener conto delle dimensioni e della complessità della sala e dello stato di salute degli operatori⁷, mentre la durata della fuoriuscita del criogeno dall'apparecchiatura NMR, è data dal costruttore dello spettrometro NMR ed è, in genere, di circa 2 - 3 minuti.

⁶ Si ipotizza, per semplicità, una fuoriuscita con un flusso costante del gas criogeno.

⁷ A titolo esemplificativo la vicinanza alla porta di uscita allo spettrometro potrebbe far ridurre la valutazione del tempo t_p , mentre problematiche fisiche (difficoltà di deambulazione) o sensoriali (di udito) dell'operatore potrebbero invece far valutare un tempo t_p maggiore.

È importante osservare che la formula del *polmone di sicurezza ponderato* è in grado di discriminare la bontà dimensionale della sala ospitante uno spettrometro NMR tenendo conto della sua morfologia. Ciò è particolarmente importante poiché - a parità di volume - la sala che ha una altezza maggiore offre, in caso di quench, maggiore sicurezza rispetto ad una sala con un'altezza inferiore. A titolo esemplificativo si considerino due sale a forma di parallelepipedo rettangolo, ciascuna di 700 m³, la prima con una superficie di 200 m² ed una altezza di 3,5 m, la seconda con una superficie di 100 m² e un'altezza di 7 m, ospitanti ciascuna la medesima tipologia di apparecchiatura NMR contenente 1.000 litri di elio liquido, cioè 1 m³, e che il tempo di svuotamento dell'apparecchiatura in un quench sia pari a 2 minuti. Ipotizzando che il tempo che gli operatori hanno per lasciare il locale in entrambi i casi sia cautelativamente stimato in 1 minuto, si ha un *polmone di sicurezza ponderato*, pari a:

$$P_{sp} = 2 \cdot S_{sala} + 750 \cdot V_{He\ Liq} \cdot (t_p / t_q) = 2 \cdot 200 + 750 \cdot 1 \cdot (1 / 2) \text{ m}^3 = 775 \text{ m}^3$$

nel primo caso, mentre nel secondo caso il *polmone di sicurezza ponderato* sarà pari a:

$$P_{sp} = 2 \cdot S_{sala} + 750 \cdot V_{He\ Liq} \cdot (t_p / t_q) = 2 \cdot 100 + 750 \cdot 1 \cdot (1 / 2) \text{ m}^3 = 575 \text{ m}^3.$$

Nella prima ipotesi la sala di 700 m³, alta 3,5 m, non risulta essere sicura in caso di quench, poiché il suo volume è inferiore a quello del *polmone di sicurezza ponderato* (700 m³ < 775 m³); mentre nella seconda ipotesi, la seconda sala con un volume equivalente alla prima, ma con un'altezza superiore, pari a 7 m, risulta esserlo, poiché il suo volume è maggiore di quello del *polmone di sicurezza ponderato* (700 m³ > 575 m³).

Concretamente si può infatti osservare che i 375 m³ di elio fuoriuscito durante il primo minuto di quench si stratificheranno dall'alto verso il basso, occupando la sala dal soffitto verso il pavimento:

- nel primo caso, per 1,875 m in altezza, arrivando cioè ad un'altezza di 1,625 m dal pavimento (raggiungendo ampiamente la zona naso-bocca, pari a 2 m, e mettendo quindi in serio pericolo l'incolumità del lavoratore). In questo caso è quindi opportuno installare dispositivi di sicurezza di cui si è argomentato in precedenza;
- nel secondo caso, per 3,75 m in altezza, arrivando cioè ad un'altezza di 3,25 m dal pavimento, permettendo quindi la fuoriuscita in sicurezza del lavoratore dalla sala, anche senza l'ausilio dei dispositivi di sicurezza⁸.

⁸ Si ricorda che il tempo di permanenza t_p , alla base del calcolo del polmone di sicurezza ponderato, è un tempo discrezionale valutato dal responsabile per la sicurezza e che, quindi, una sua sottostima potrebbe compromettere la corretta valutazione del rischio.

8. ASPETTI RELATIVI AL RISCHIO INCENDIO

Fermo restando le competenze specifiche del servizio di prevenzione e protezione in materia, sia che venga preso in considerazione il modello completo che quello semplificato, nel laboratorio NMR, dovranno essere sempre previsti degli estintori amagnetici a CO₂, da apporre con sostegni idonei ed identificati come per legge. Essi possono essere tenuti sia all'interno (se l'ambiente è sufficientemente grande da consentirlo), e sia all'esterno del laboratorio, purché nelle sue immediate vicinanze. Se in prossimità del laboratorio NMR fossero presenti anche estintori non amagnetici oppure non a CO₂, opportuna cartellonistica dovrà indicare che non potranno essere utilizzati all'interno delle zone controllate. Infatti l'utilizzo di estintori a CO₂ - in caso di principio d'incendio - consente di non danneggiare l'elettronica e gli spettrometri mentre l'uso di estinguenti chimici può invece compromettere gravemente l'eventuale successivo ripristino.

L'utilizzo di estintori non a CO₂ all'interno del laboratorio NMR va preso quindi in considerazione soltanto quando l'incendio è divampante e non c'è alcuna speranza di salvare la strumentazione. L'utilizzo di estintori con bombole ferromagnetiche in prossimità dello spettrometro non deve essere mai preso in considerazione se non per situazioni di elevatissimo pericolo.

Eventuali comunicazioni preventive o periodiche al comando provinciale dei vigili del fuoco dovranno essere fatte, se del caso, in ossequio al vigente quadro normativo di riferimento.

Per quanto attiene alle norme da seguire in caso di emergenza dovuta allo svilupparsi di fiamma libera, si rimanda al successivo capitolo 10 dedicato alle emergenze.

9. REGOLAMENTO DI SICUREZZA

Il Regolamento di sicurezza è il documento che contiene tutte le procedure operative previste dal RIPU e dall'ERGAS, da essi redatte ciascuno per quanto di propria competenza, per la gestione dell'attività e della sicurezza all'interno del laboratorio NMR. Nel caso si applichi il modello semplificato, sarà il responsabile della sicurezza designato (tipicamente, il responsabile del servizio prevenzione e protezione) la figura preposta a predisporre tale regolamento. Per ciascuna tipologia di personale che potrà accedere al laboratorio dovranno essere previste le regole di accesso e i tempi di permanenza all'interno delle zone di rischio, nel rispetto dei limiti di esposizione previsti per legge. Copia del regolamento dovrà essere tenuta nel laboratorio, mentre l'estratto relativo alle procedure da seguire in caso di emergenza dovrà essere affisso per esteso in prossimità dei display di controllo e dei pulsanti di sicurezza. È buona prassi che le regole fondamentali relative all'accesso e agli aspetti comportamentali da tenere all'interno del laboratorio siano chiaramente indicate già all'esterno del laboratorio stesso e riportate all'interno di note informative. Il datore di lavoro dovrà garantire la formazione di tutto il personale autorizzato ad accedere alle zone di rischio iscritto nell'apposito elenco, avvalendosi del RIPU e dell'ERGAS. Il regolamento di sicurezza è emanato dal datore di lavoro che ne chiede il rispetto a tutto il personale operante nel laboratorio NMR.

Quanto segue vuole rappresentare un esempio dei contenuti che un regolamento di sicurezza redatto per un laboratorio NMR dovrebbe prevedere, da contestualizzare in base al contesto lavorativo e alle specificità delle procedure adottate. Il regolamento di sicurezza è l'insieme delle regole comportamentali a cui tutti i lavoratori devono attenersi al fine di prevenire i possibili incidenti e ridurre i danni che dai possibili incidenti ne potrebbero derivare. Esso deve essere periodicamente rivalutato, se del caso modificato o implementato, sulla base di elementi o novità sopraggiunte che ne inducano la necessità, come, per esempio, l'avvio di nuove procedure, l'avvento di situazioni incidentali, l'evoluzione delle attività svolte. Tutto il personale ne è tenuto al rispetto e a segnalare al RIPU e all'ERGAS eventuali situazioni che ne evidenziano l'inadeguatezza, al fine di migliorarne i contenuti ed elevare lo standard di sicurezza.

9.1 NORME GENERALI DI SICUREZZA

Le norme generali di sicurezza devono essere rispettate da chiunque, a qualsiasi titolo, acceda in un laboratorio NMR.

L'ingresso alle zone controllate deve essere limitato ai lavoratori autorizzati, indicati nell'elenco istituito e aggiornato dal datore di lavoro. Le zone controllate devono essere identificate a terra con una striscia adesiva, che segnali la zona dove il campo statico è pari 0,5 mT.

Chiunque acceda per la prima volta all'interno delle zone controllate del laboratorio NMR è tenuto a sottoporsi a verifica preliminare di compatibilità utilizzando una 'Scheda di accesso alla zona controllata del laboratorio NMR'. Tale scheda sarà validata dal datore di lavoro o da persona da lui delegata, che, preso atto della compatibilità del soggetto ne autorizzerà l'accesso. In essa sono elencate le controindicazioni all'esposizione ai CEM, ed è prevista, in calce alla stessa, l'apposizione della firma del richiedente l'autorizzazione. La modulistica deve prevedere altresì anche la firma di chi ne ha autorizzato l'accesso. Per gli accessi successivi è sufficiente iscrivere il nominativo in un registro degli accessi, che permetterà di non compilare per un anno la nuova scheda di accesso, salvo non fosse confermata l'idoneità all'esposizione ai CEM.

Per gli operatori addetti alla manutenzione ordinaria e alla pulizia dell'impianto, se appartenenti a ditte esterne, l'ingresso è consentito su autorizzazione specifica del datore di lavoro o persona da lui delegata sulla base del Documento di valutazione dei rischi interferenziali. Anche costoro dovranno essere inseriti nell'elenco degli autorizzati - in quanto lavoratori abituali - e dovranno possedere l'idoneità alla mansione specifica rilasciata da un medico competente, alla stessa stregua del personale addetto alle attività del laboratorio.

L'ingresso alla zona controllata è quindi vietato ai lavoratori dichiarati non idonei dal medico competente, e a tutti coloro che presentano controindicazioni medico-anamnestiche. È rigorosamente vietato introdurre all'interno della zona controllata oggetti ferromagnetici mobili. Quindi prima di accedere alla zona controllata segnalata nell'intorno dello spettrometro, dovranno essere depositati tutti gli oggetti metallici, ferromagnetici e di supporto magnetico in proprio possesso (telefoni cellulari, orologi, chiavi, collane, monili, gioielli, forcine, monete, carte e tessere magnetiche, ecc.).

Presso la zona comandi dell'apparecchiatura NMR e sulla porta di accesso al laboratorio deve essere mantenuto esposto ed aggiornato un elenco con i recapiti del personale da contattare in caso situazioni di emergenza.

Ogni eventuale anomalia di funzionamento dell'impianto NMR o possibile condizione di pericolo deve essere registrata e prontamente riferita al datore di lavoro e ai responsabili del laboratorio e della sicurezza.

Deve altresì essere vietato rimuovere ogni tipo di segnaletica presente all'entrata e all'interno dei locali del laboratorio NMR e, all'interno di quest'ultimo, deve essere assolutamente vietato fumare, mangiare o svolgere attività non di pertinenza alla sua destinazione d'uso e non previste nell'ambito delle procedure operative codificate.

Una scheda di accesso alla zona controllata va sottoposta a visitatori, accompagnatori e a tutti coloro che accedono alla zona controllata del laboratorio NMR, mutuandola - per quanto possibile - dall'Appendice 2 di cui Allegato 1 d.m. salute 10/08/2018 già citato. Scopo della scheda è accertare preventivamente la presenza di controindicazioni all'accesso in zona controllata.

La verifica ha lo scopo di accertare l'assenza di controindicazioni all'esposizione ai rischi legati ai campi elettromagnetici presenti nelle zone controllate all'interno del laboratorio NMR. Ogni persona deputata all'accesso deve leggere attentamente quanto indicato al fine di escludere la propria incompatibilità con i CEM presenti all'interno

della zona controllata e al termine firmare il consenso all'accesso dichiarando di aver compreso le condizioni di rischio. La presente scheda deve essere poi controfirmata dal soggetto preposto a rilasciare l'autorizzazione all'accesso dopo aver fornito le necessarie informazioni sui rischi presenti e sugli aspetti comportamentali da tenere all'interno delle zone controllate del laboratorio NMR.

9.2 NORME DI SICUREZZA PER I LAVORATORI

Per lavoratori abituali si intendono tutti quei lavoratori direttamente o indirettamente coinvolti nell'attività del laboratorio NMR, ovvero oltre alla figura del ricercatore, del collaboratore tecnico, del borsista/assegnista/dottorando, anche quella del personale addetto alle pulizie, del personale addetto alla manutenzione ed al rabbocco dei criogeni, nonché tutti coloro che per giustificato motivo sono autorizzati dal datore di lavoro ad operare all'interno del laboratorio NMR per la specifica mansione lavorativa svolta.

I lavoratori direttamente connessi alle attività del laboratorio NMR, e quindi caratterizzati da una presenza, non necessariamente prolungata, ma comunque pressoché continuativa all'interno di esso, devono essere formalizzati all'interno di un elenco nominativo, denominato 'elenco del personale autorizzato'.

I lavoratori la cui presenza risulta, invece, essere saltuaria o comunque non continuativa all'interno del laboratorio NMR devono essere di volta in volta autorizzati, come già precisato in precedenza.

I lavoratori debbono conoscere ed osservare rigidamente le norme interne del regolamento di sicurezza, che viene consegnato durante le sessioni di formazione/informazione e controllare che chiunque acceda al laboratorio di spettrometria le rispetti. Essi devono essere altresì informati dei rischi connessi alla presenza del campo magnetico statico, ai gradienti di campo, alle radiofrequenze e alla presenza di gas criogeni.

Il personale di servizio presso il laboratorio NMR deve avere piena conoscenza ed osservare rigidamente il Regolamento di sicurezza, consegnato durante le sessioni di formazione/informazione, e controllare che tali norme siano rispettate da chiunque acceda al laboratorio NMR a qualsiasi titolo.

I lavoratori devono essere altresì informati sui rischi connessi al campo statico di induzione magnetica, ai gradienti di campo magnetico, alle onde elettromagnetiche a radiofrequenza ed all'eventuale fuoriuscita dei criogeni.

Per i lavoratori sono valide le norme generali di sicurezza inerenti alle aree di rischio, ed in ogni caso va operativamente e con continuità garantito quanto segue.

Tutti i lavoratori devono astenersi dal compiere, all'interno del laboratorio NMR, operazioni che non siano di propria competenza. All'interno della zona controllata è vietato introdurre oggetti prevalentemente o totalmente ferromagnetici, nonché oggetti ad uso personale sensibili al campo magnetico statico (orologi, collane, monili, telefoni cellulari, tessere e carte magnetiche).

La porta del laboratorio NMR deve rimanere il più possibile chiusa, e il laboratorio deve

essere mantenuto in ordine, con un percorso intorno all'apparecchiatura NMR che deve essere sempre lasciato libero da ingombri, e del tutto accessibile nonché percorribile.

Tutte le anomalie di funzionamento ed eventuali incidenti devono essere annotati in un apposito registro degli incidenti, e segnalati immediatamente al responsabile del laboratorio NMR, al responsabile della sicurezza e al datore di lavoro.

In caso di incidente, i lavoratori, che devono comunque limitare la permanenza nelle immediate vicinanze al magnete il tempo strettamente necessario allo svolgimento delle attività programmate, saranno chiamati ad intraprendere tutte le misure di sicurezza e di messa in protezione dell'ambiente previste.

Misure di attenzione maggiori dovranno essere intraprese per caratteri di esposizione più elevati nei laboratori NMR che ospitano apparecchi ad altissimo campo, eventualmente prevedendo anche limitazioni nei movimenti nelle zone a maggiore rischio se rientranti nelle condizioni di esposizione stabilite dal d.lgs. 159/2016.

Il lavoratore che, nello svolgimento delle sue attività programmate all'interno della sala magnete, accusasse degli effetti sensoriali transitori indotti da campi magnetici statici quali ad esempio vertigini, nausea o fosfeni, deve comunicarlo al medico competente.

9.2.1 Sorveglianza sanitaria per i lavoratori

I lavoratori possono prestare servizio presso il laboratorio NMR solamente previa dichiarazione di idoneità sanitaria specifica, rilasciata ai sensi dell'art. 41 del d.lgs. 81/2008 e s.m.i, da un medico competente sulla base degli accertamenti medici previsti, correlati ai fattori di rischio specifici. L'idoneità va rilasciata almeno annualmente e, una volta ottenuta, comporta per i lavoratori l'inserimento del loro nome nell'elenco del personale autorizzato.

Il lavoratore dovrà comunicare tempestivamente al medico competente una eventuale sopraggiunta variazione delle sue condizioni fisiche, con particolare attenzione a quelle che possono determinare un'inidoneità all'esposizione ai CEM. In particolare, le lavoratrici dovranno comunicare lo stato di gravidanza, che non le permetterà di lavorare in zona controllata, come per i lavoratori con controindicazioni all'esposizione ai CEM (portatori di pace-maker, di impianti biomedicali dotati di circuiti elettronici e di protesi, clips vascolari, preparati metallici intracranici e schegge in materiale ferromagnetico).

9.3 NORME SPECIFICHE PER IL PERSONALE ADDETTO ALLE PULIZIE

Le seguenti norme di sicurezza riguardano specificamente tutto il personale addetto alle pulizie ed integrano le norme generali di sicurezza e le norme di sicurezza per i lavoratori.

Ogni operazione all'interno della zona controllata, ma, comunque secondo un principio di gradualità, anche nelle zone immediatamente limitrofe, dovrà essere svolta in accordo con le indicazioni di seguito riportate. In particolare, il personale addetto alle

pulizie è tenuto ad eseguire esclusivamente le operazioni concordate e programmate con il datore di lavoro, senza mai prendere iniziative al di fuori di quanto strettamente stabilito: va informato in merito ai fattori di rischio presenti nel laboratorio, e a tale informazione deve fare compendio l'elaborazione di opportune indicazioni operative che minimizzino ogni possibile fattore di rischio connesso alla presenza dello spettrometro NMR.

Il personale addetto alle pulizie non deve assolutamente disconnettere i cavi delle apparecchiature e pulire elementi sotto tensione e rimuovere la segnaletica.

La permanenza all'interno del laboratorio NMR deve essere ridotta al tempo strettamente necessario per eseguire esclusivamente le operazioni previste e programmate.

9.4 NORME SPECIFICHE PER IL PERSONALE ADDETTO ALLA MANUTENZIONE DELL'APPARECCHIATURA NMR

La manutenzione ordinaria e straordinaria dell'apparecchiatura NMR deve essere eseguita esclusivamente da personale tecnico specializzato come quello della ditta installatrice. Esso deve essere stato preventivamente edotto sui rischi inerenti al campo statico di induzione magnetica, alle onde elettromagnetiche a radiofrequenza, ai gradienti di campo magnetico e ai criogeni. Gli interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria devono essere eseguiti solamente in concomitanza della sospensione dell'attività, in accordo con il responsabile del laboratorio NMR.

Il personale addetto alla manutenzione dell'apparecchiatura NMR è tenuto ad informare il datore di lavoro dell'impianto NMR in merito alla natura e ai dettagli di ogni intervento effettuato.

9.5 NORME PER L'IMPIEGO DI SOSTANZE CRIOGENE

I liquidi criogenici generalmente impiegati sono azoto ed elio. I potenziali pericoli derivanti dalla loro manipolazione sono dovuti innanzitutto alla loro bassissima temperatura (azoto $-195\text{ }^{\circ}\text{C}$, elio $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ 9), in secondo luogo dal loro rapporto di conversione liquido/gas.

In particolare un litro di elio liquido si espande a 750 litri di gas, mentre 1 litro di azoto liquido si espande a 700 litri di azoto gassoso, con conseguente riduzione della percentuale di ossigeno nell'ambiente.

Ai fini dell'applicazione delle procedure di sicurezza è obbligatorio:

- evitare il contatto accidentale con liquidi criogenici o gas evaporati, utilizzando dispositivi di protezione individuale quali guanti, camici e maschere protettive;
- mantenere i contenitori dei liquidi criogenici in aree ben ventilate;
- effettuare il trasporto dei contenitori di gas criogenico con appositi carrelli, lungo un percorso prestabilito e, se del caso, messo in sicurezza durante il trasporto in questione, dal responsabile per la sicurezza.

Figura 19 Schema del rabbocco del liquido criogeno in uno spettrometro NMR

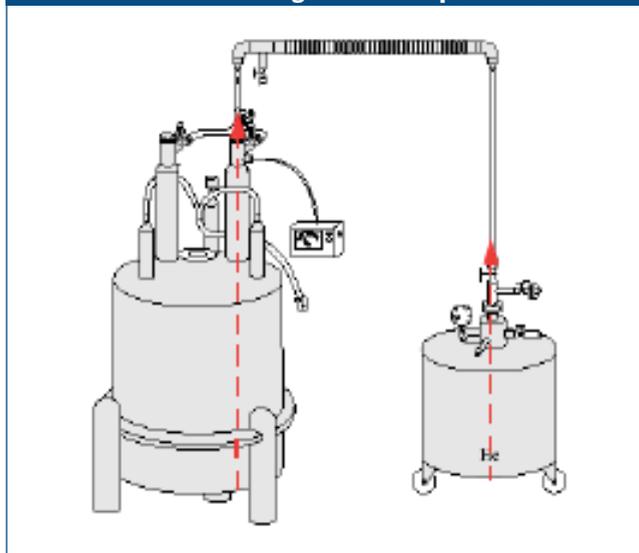


Foto tratta dai libretti di istruzioni di spettrometri NMR Bruker

Le operazioni di travaso - che si rendono necessarie, in fase di collaudo per lo start up dell'apparecchiatura, e poi periodicamente a causa del fisiologico consumo del liquido criogenico allocato dentro l'apparecchiatura - devono essere codificate ed effettuate dall'ERGAS, che è tenuto ad acquisire dalla ditta installatrice tutte le informazioni necessarie all'espletamento di tali operazioni. Gli operatori addetti al travaso dei liquidi criogenici, se diversi dal RIPU, devono a loro volta aver ricevuto da quest'ultimo la formazione del caso, ed attenersi alle procedure codificate. Qualsiasi improvvisazione può di fatto rappresentare un potenziale scenario di grave rischio: lo schema ordinario utilizzato nelle operazioni di rabbocco è riportato nella Figura 19.

Per approfondire le valutazioni inerenti le procedure bisogna sempre fare riferimento al manuale d'uso dello spettrometro, che deve essere reso disponibile in lingua italiana, fornito in copia cartacea dalla ditta costruttrice e tenuto a disposizione degli operatori all'interno del laboratorio NMR.

Tutte le procedure di refilling dovranno essere codificate all'interno del regolamento di sicurezza, con indicata la definizione dei percorsi da seguire all'interno della struttura per raggiungere il laboratorio NMR e gli eventuali locali/aree di stoccaggio idonei alla destinazione d'uso previsti per la conservazione dei dewar contenenti i liquidi criogenici.

Il rabbocco dei criogeni può essere effettuato esclusivamente da personale tecnico specializzato, che sia stato edotto sui rischi presenti nel laboratorio NMR relativi ai CEM.

Durante l'operazione di rabbocco dell'elio non dovranno essere introdotti oggetti ferromagnetici (bombole, contenitori, attrezzi di lavoro) e dovranno essere utilizzati da parte dei lavoratori i dispositivi di protezione individuale necessari alla minimizzazione del rischio (vedi Figura 20).

Il rabbocco dei criogeni dovrà avvenire previa: sospensione dell'attività analitica; attivazione manuale del sistema di estrazione di emergenza (se presente) o apertura delle finestre allocate in alto previste per l'evacuazione dell'elio; accordo con il responsabile del laboratorio NMR e con il responsabile della sicurezza che dovranno essere informati sugli interventi da svolgersi. Dovrà altresì essere evitata qualsiasi operazione che possa comportare la formazione di scintille in prossimità delle tubazioni di adduzione tra il dewar e lo spettrometro NMR.

Figura 20**Configurazione per il rabbocco del criogeno**

Foto scattata presso un laboratorio NMR del CNR di Sassari

Operativamente, le istruzioni di lavoro per l'utilizzo e la manipolazione del criogeno devono prevedere le seguenti accortezze:

- seguire le indicazioni riportate nelle schede di sicurezza del criogeno utilizzato che la ditta fornitrice deve rilasciare all'atto del primo acquisto;
- mantenere pulite le superfici su cui l'aria si condensa, in quanto l'aria condensata è arricchita di ossigeno (l'azoto evapora prima dell'ossigeno), pertanto, soprattutto in prossimità delle valvole e degli sfiami, dove può essere presente olio o altro lubrificante, un'elevata concentrazione di ossigeno può accrescere il rischio di incendio in caso di scintille;
- controllare, secondo le indicazioni della ditta fornitrice, il corretto funzionamento delle valvole di sicurezza dei contenitori di liquido criogeno, in quanto il trasferimento di una piccola quantità di calore al liquido determina l'espansione del liquido stesso;
- mantenere i contenitori dei criogeni in aree ben ventilate in quanto, pur non essendo sostanze tossiche, possono provocare asfissia. Lo stoccaggio deve avvenire in ambienti autorizzati allo scopo.

9.6 NORME SPECIFICHE PER IL PERSONALE ADDETTO ALLE MANUTENZIONI

Le norme di sicurezza per il personale addetto alla manutenzione generale dell'impianto

to NMR si riferiscono a tutto il personale tecnico che acceda al laboratorio NMR per interventi non direttamente connessi alla manutenzione dell'apparecchiatura NMR e al rabbocco dei criogeni.

In particolare, tali interventi comprendono quelli a carico degli impianti elettrico, idrico e di condizionamento.

Tale personale, parimenti agli altri lavoratori operanti in ambiente NMR, dovrà essere reso edotto sui rischi inerenti alla presenza di CEM e gas criogeni.

Ogni suo intervento dovrà essere effettuato in concomitanza della sospensione dell'attività e previo accordo con il datore di lavoro, astenendosi dal compiere operazioni che non siano di propria pertinenza.

È opportuno introdurre il minor numero possibile di attrezzi all'interno del laboratorio NMR e, se necessariamente di natura ferromagnetica, con grande attenzione rispetto alle zone di rischio individuate al suo interno, prestando attenzione a non lasciare cadere piccoli oggetti di ferro quali viti, bulloni, rivetti e chiodi, che potrebbero essere attratti dal magnete - se introdotti nelle zone di rischio - e arrecare eventuali danni alle strutture e alle persone presenti.

È altresì vietato introdurre all'interno della sala magnete cassette porta attrezzi, bombole, saldatrici, martelli e qualsiasi oggetto o utensile di lavoro in materiale ferromagnetico. Durante operazioni che comportino produzione di polveri, residui terrosi o schegge metalliche è necessario fare attenzione affinché tali sostanze non danneggino o sporchino l'apparecchiatura NMR.

Se tali operazioni si svolgono all'esterno del laboratorio la porta della sala deve essere mantenuta chiusa, in caso contrario deve essere predisposto un opportuno sistema di protezione dell'apparecchiatura NMR.

In caso di interventi di manutenzione da effettuare nelle immediate vicinanze del terminale del tubo del quench, il personale dovrà prestare molta attenzione e permanere in sua prossimità esclusivamente il tempo minimo necessario per eseguire le operazioni programmate.

È opportuno, inoltre, che il personale in questione, soprattutto per interventi prolungati, sia dotato di opportune misure di protezione stabilite dal responsabile della sicurezza.

Al termine di ogni intervento non devono essere lasciati oggetti metallici e ferromagnetici all'interno del laboratorio NMR e null'altro che non sia di pertinenza al laboratorio stesso. Il personale di cui trattasi è tenuto a informare il datore di lavoro e/o suo delegato in merito alla natura e ai dettagli di ogni intervento effettuato.

9.7 NORME DI SICUREZZA PER OSPITI E VISITATORI

Per gli ospiti ed i visitatori sono valide tutte le norme generali di sicurezza ed inerenti alle aree di rischio.

In particolare deve essere vietato l'accesso all'interno del laboratorio NMR senza preventiva autorizzazione. L'autorizzazione all'accesso nella zona controllata del laboratorio NMR è subordinata al soddisfacimento delle misure di sicurezza già introdotte in precedenza.

10. LE EMERGENZE

Le procedure di sicurezza relative a situazioni di emergenza comprendono le principali procedure operative che devono essere messe in atto da tutti gli operatori presso il laboratorio NMR in caso di emergenza. È fondamentale che le procedure di sicurezza in situazioni di emergenza siano preventivamente discusse e concordate con il responsabile del servizio di prevenzione e protezione, in particolare per quanto concerne l'emergenza incendio e l'individuazione delle vie di esodo dal laboratorio NMR.

10.1 QUENCH DEL MAGNETE CON PERDITE DI ELIO ALL'INTERNO DEL LABORATORIO NMR

Il quench rappresenta una rapida evaporazione dell'elio liquido contenuto nel serbatoio del magnete, generalmente a seguito di un accidentale ed eccessivo riscaldamento di zone all'interno dello spettrometro dove si trovano le bobine. Durante le fasi di un quench è tipico udire un suono caratteristico simile ad un sibilo. Se lo spettrometro è dotato di una linea di evacuazione, l'elio gassoso viene convogliato all'esterno del laboratorio NMR in luogo protetto. In assenza della tubazione dedicata, l'elio si disperde nel laboratorio dopo aver fatto saltare una valvola *a tappo*. Le perdite di elio, generalmente visibile dalla veloce diffusione di vapore di colore bianco sulla testata del magnete, possono essere rilevate dall'entrata in funzione del sistema di allarme ossigeno che, al raggiungimento di una concentrazione di ossigeno del 19%, attiva un allarme acustico a cui segue, al raggiungimento di una concentrazione di ossigeno del 18% l'attivazione della ventilazione di emergenza o l'apertura delle finestre allocate in alto.

In caso di quench, il personale presente dovrà: allontanarsi in fretta dal laboratorio, avvertendo della situazione di pericolo il personale eventualmente presente, attivare la ventilazione di emergenza o l'apertura delle porte allocate in alto qualora uno di questi sistemi di sicurezza pur presenti non si fossero attivati, chiudere la porta della sala fino alla fuoriuscita completa dell'elio. Qualora invece non fossero presenti i dispositivi di sicurezza precedentemente citati, gli operatori dovranno allontanarsi in fretta dopo aver aperto le finestre, e chiuso il locale fino al dissolvimento dell'elio.

10.2 ALLARME OSSIGENO

In caso di entrata in funzione del sistema di allarme ossigeno il personale di servizio presso il laboratorio NMR è tenuto a seguire le seguenti procedure:

1. attivare manualmente il sistema di estrazione di emergenza/aprire le finestre del locale;

2. uscire velocemente dal laboratorio;
3. verificare la presenza di indizi relativi a:
 - un quench del magnete o perdite di elio all'interno del laboratorio (vedi norme emergenza specifiche);
 - un principio di incendio all'interno del laboratorio (in tal caso attivare le procedure previste nel piano di emergenza).

10.3 EMERGENZA INCENDIO

L'emergenza incendio scatta in concomitanza di principio di incendio all'interno del laboratorio NMR. Il personale di servizio è tenuto a seguire le indicazioni riportate nel piano di emergenza:

- premere il pulsante di sgancio elettrico;
- usare nel laboratorio esclusivamente gli estintori amagnetici a CO₂ presenti in dotazione nel laboratorio.

10.4 BLACK OUT ELETTRICO

Nel caso in cui si verifichi un *black out* elettrico il personale di servizio presso il laboratorio NMR è tenuto a procedere come di seguito riportato:

- avvertire il personale tecnico addetto alla manutenzione dell'impianto elettrico;
- ristabilita l'alimentazione elettrica, verificare il corretto funzionamento dell'apparecchio NMR;
- informare il datore di lavoro dell'impianto NMR in merito alla natura dell'incidente.

10.5 INCIDENTI PER INTRODUZIONE DI OGGETTI FERROMAGNETICI

Nel caso in cui vengano malauguratamente introdotti nel laboratorio oggetti ferromagnetici, e questi vengano attratti dal magnete, si possono creare due possibili scenari:

1. l'oggetto, indipendentemente dalle dimensioni resta attaccato sullo spettrometro senza arrecare danni alle persone. In tal caso occorre cercare di rimuovere l'oggetto e, se ciò non fosse possibile, avvertire il datore di lavoro;
2. l'oggetto ha colpito qualcuno dei presenti. In tal caso occorre soccorrere il malcapitato e, qualora egli fosse rimasto intrappolato fra lo spettrometro e l'oggetto ed in pericolo di vita, va effettuato il quench pilotato.

Al di là degli obblighi di segnalazione degli incidenti già evidenziati ai sensi di legge, è buona prassi, successivamente all'accadimento di un evento anomalo o al verificarsi di una situazione di pericolo coinvolgere tutte le figure professionali interne implicate per competenza, al fine di comprendere le ragioni dell'accaduto ed ottimizzare la gestione della sicurezza.

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 dedizione alla 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, che 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 e s.m.i.

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 esistenti 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, per la quale l'Inail auspica opportune iniziative nelle sedi competenti.

La *Sezione supporto al servizio sanitario in materia di radiazioni* dell'Inail, auspicando un favorevole accoglimento di questo lavoro nella comunità scientifica di settore, vuole quindi cercare di contribuire, con questo aggiornamento delle *Indicazioni operative* del 2011, ad una più favorevole standardizzazione dei metodi gestionali della sicurezza in ambito NMR, proponendo un *modus operandi* che risulti più confacente alle reali situazioni connesse alla tipologia di installazioni oggi presenti sul territorio nazionale, ove necessario puntando più sul creare una piena consapevolezza del rischio piuttosto che a proporre modelli organizzativi e requisiti strutturali magari del tutto esaustivi ma scarsamente adottabili per la loro rigidità.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

Campanella F, Mattozzi M, D'Avanzo MA et al. Indicazioni operative dell'Inail per la gestione della sicurezza e della qualità in Risonanza Magnetica. Inail; 2015.

Campanella F, Mattozzi M, Culeddu N. Le applicazioni scientifiche della Risonanza Magnetica Nucleare (NMR): criticità, indicazioni e proposte operative per la gestione della sicurezza. Inail; 2012.

Campanella F, Mattozzi M. Installazione di dispositivi medici dotati di impianti a pressione: aspetti normativi, tecnici e procedurali correlati alla verifica della conformità di fabbricazione e d'installazione secondo la "regola d'arte" per le apparecchiature a risonanza magnetica che utilizzano magneti superconduttori [Internet]. URL: <https://www.inail.it/cs/internet/attivita/ricerca-e-tecnologia/area-salute-sul-lavoro/sistemi-di-sorveglianza-e-supporto-al-servizio-sanitario-nazionale/radiazioni-ionizzanti-e-imaging-medico.html?id1=6443097230584#anchor> [consultato dicembre 2019].

Campanella F, Mattozzi M. Realizzazione alla regola dell'arte degli impianti di ventilazione nelle sale di risonanza magnetica. Inail; 2012.

Milani R, Coda S, Bacconi G et al. Indicazioni operative per la valutazione del rischio all'esposizione professionale ai campi magnetici statici nella risonanza magnetica ad alto campo [Internet]. URL: <https://www.inail.it/cs/internet/attivita/ricerca-e-tecnologia/area-salute-sul-lavoro/sistemi-di-sorveglianza-e-supporto-al-servizio-sanitario-nazionale/radiazioni-ionizzanti-e-imaging-medico.html?id1=6443097230584#anchor> [consultato dicembre 2019].

Milani R, Coda S, Bacconi G et al. Applicazione del decreto 159/2016: valutazione del rischio da movimento nella pratica di risonanza magnetica [Internet]. URL: <https://www.inail.it/cs/internet/attivita/ricerca-e-tecnologia/area-salute-sul-lavoro/sistemi-di-sorveglianza-e-supporto-al-servizio-sanitario-nazionale/radiazioni-ionizzanti-e-imaging-medico.html?id1=6443097230584#anchor> [consultato dicembre 2019].

RIFERIMENTI NORMATIVI

Decreto ministero salute 10 agosto 2018, n. 236

Determinazione degli standard di sicurezza e impiego per le apparecchiature a risonanza magnetica. (Gazzetta ufficiale n.236 del 10/10/2018).

Decreto del Presidente della Repubblica 08 agosto 1994, n. 542

Regolamento recante norme per la semplificazione del procedimento di autorizzazione all'uso diagnostico di apparecchiature a risonanza magnetica nucleare sul territorio nazionale. (Gazzetta ufficiale n. 219 del 19/09/1994)

Decreto Legislativo 09 aprile 2008, n 81

Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro (Gazzetta ufficiale n. 101 del 20/04/2008). Come modificato dal decreto legislativo 106/2009 e dal decreto legislativo 159/2016 (Gazzetta ufficiale n. 192 del 18/08/2016).

ACRONIMI

CEM	Campi elettromagnetici
Asl	Azienda sanitaria locale
Cnr	Consiglio nazionale delle ricerche
ERGAS	Esperto responsabile della gestione degli aspetti di sicurezza
RIPU	Responsabile impianto e delle procedure di utilizzo
Inail	Istituto nazionale per l'assicurazione contro gli infortuni sul lavoro
SSN	Servizio sanitario nazionale
T	Tesla
G	Gauss
mT	Millitesla
NMR	Nuclear magnetic resonance
PED	Direttiva 2014/68/UE <i>pressure equipment directive</i>
RSPP	Responsabile del servizio di prevenzione e protezione

PRECISAZIONI

Le immagini riportate nel presente lavoro perseguono il solo scopo di esplicitare con la massima chiarezza - anche visiva - il fine scientifico e divulgativo dei concetti espressi nel testo, perseguendo il solo obiettivo di trasmettere aspetti tecnici, procedure operative e finalità che possano meglio infondere conoscenza scientifica e cultura della sicurezza nei settori trattati. Non sono perseguiti fini pubblicitari, né diffamatori, né commerciali di alcuna forma e genere.

FONTI

Per l'estensione di alcune parti del testo sono state prese in considerazione immagini prese dai libretti di istruzione degli spettrometri NMR o per acquisizione diretta dei principali marchi operanti nel settore NMR nel mondo, previa liberatoria per l'utilizzo, oltre che da alcuni siti internet di seguito citati. Si ritiene però doveroso sottolineare l'attenzione dei costruttori nei confronti della sicurezza nell'NMR e la cura dei particolari nella descrizione dei sistemi di sicurezza da adottare, purtroppo rimasti spesso solo all'interno delle pagine dei libretti in molte delle realtà visitate per la stesura del presente lavoro.