

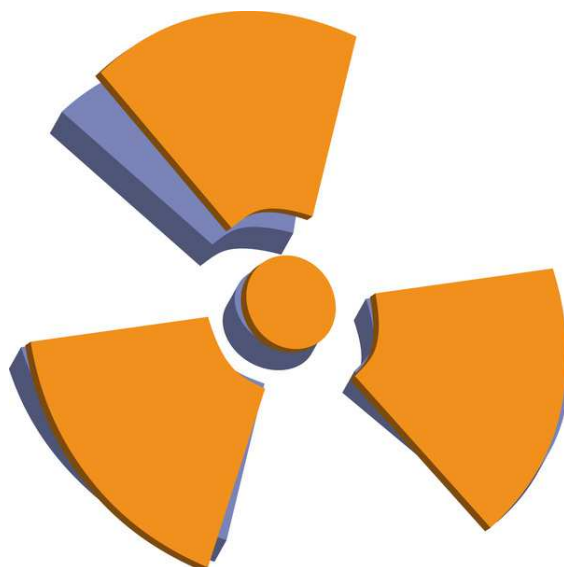


AZIENDA SANITARIA PROVINCIALE N° 2 DI CALTANISSETTA

Direttore Generale: Dr. Salvatore Paolo Cantaro

LA RADIOPROTEZIONE DEL PAZIENTE, DEL LAVORATORE E DELLA POPOLAZIONE

Opuscolo informativo dedicato ai lavoratori dell'Azienda Sanitaria Provinciale di Caltanissetta



A cura del ***Dr. Francesco Di Rosa*** e del ***Dr. Alessandro Falzone***
Anno: 2012 – Revisione: 0

LA RADIOPROTEZIONE DEL PAZIENTE, DEL LAVORATORE E DELLA POPOLAZIONE

Presentazione

Tra gli impegni più qualificanti che caratterizzano le azioni preventive nei luoghi di lavoro, un significato rilevante assume la corretta informazione dei soggetti coinvolti nelle attività lavorative. La conoscenza delle nozioni di base della radioprotezione è di fondamentale importanza non solo per l'aspetto normativo, ma per gli utilizzatori di radiazioni ionizzanti. Un operatore consapevole, della propria attività e informato sugli eventuali rischi presenti nelle quotidiane attività, sa mettere in atto modelli comportamentali tali da essere di garanzia per sé e per gli altri a tutela della salute e del benessere.

Penso che il testo proposto possa rappresentare un valido strumento di informazione del personale addetto ad attività comportanti rischio di esposizione alle radiazioni ionizzanti.

La chiave di lettura del documento è quella di fornire al lavoratore una sintesi che, pur se inevitabilmente non esaustiva, possa quantomeno contribuire alla "formazione" degli operatori con apparecchiature radiologiche e con sorgenti radioattive.

Per la semplicità e la chiarezza della trattazione, il testo ha il pregio di poter essere letto e compreso non solo dagli "addetti ai lavori", ma anche da chi, non direttamente coinvolto, opera in un contesto di lavoro dove tali problematiche sono presenti.

Resta l'auspicio che questo manuale possa costituire, almeno in parte, uno stimolo a una maggiore conoscenza delle radiazioni ionizzanti, maturando la consapevolezza che il loro impiego, di indubbia utilità in campo medico, richiede l'adozione di semplici ma indispensabili accorgimenti al fine di garantire il conseguimento del più vantaggioso rapporto rischio/beneficio per paziente, operatore e popolazione.

Inoltre, è auspicabile che la divulgazione di questo volumetto dia l'opportunità sia agli operatori, ma anche tutta la popolazione, di vedere con occhio più preparato e cosciente il rischio connesso con le radiazioni.

L'elaborato viene rivolto agli operatori sanitari della nostra azienda, con lo scopo di assolvere al compito di formazione e informazione del personale come precisamente indicato dal D.Lgs 230/95 e dal D.Lgs 187/00.

*Il Direttore Generale
Dr. Salvatore Paolo Cantaro
Azienda Sanitaria Provinciale N. 2 di Caltanissetta*

LA RADIOPROTEZIONE DEL PAZIENTE, DEL LAVORATORE E DELLA POPOLAZIONE

1. GENERALITA' SULLE RADIAZIONI IONIZZANTI

1.1 Grandezze e unità di misura delle radiazioni ionizzanti.....	pag 5
1.1.1 La dose media assorbita.....	pag 6
1.1.2 La dose equivalente.....	pag 6
1.1.3 La dose efficace.....	pag 7
1.1.4 La dose impegnata.....	pag 7
1.2 Irradiazione esterna e irradiazione interna.....	pag 7
1.2.1 Irradiazione esterna.....	pag 7
1.2.2 Irradiazione interna.....	pag 8
1.3 La penetrazione delle radiazioni ionizzanti nella materia.....	pag 9
1.3.1 Le particelle α	pag 9
1.3.2 Particelle β ed elettroni accelerati.....	pag 10
1.3.3 Fotoni X e gamma.....	pag 10
1.3.4 Neutroni.....	pag 10

2. EFFETTI BIOLOGICI DELLE RADIAZIONI IONIZZANTI

2.1 Danni somatici deterministici.....	pag 11
2.2 Danni somatici stocastici.....	pag 12
2.3 Danni genetici stocastici.....	pag 13
2.4 Irradiazione in utero (embrione e feto).....	pag 13

3. LA RADIOPROTEZIONE DEL LAVORATORE E DELLA POPOLAZIONE

3.1 Strumenti operativi di sorveglianza fisica della radioprotezione.....	pag 16
3.1.1 Datore di lavoro: definizione e compiti.....	pag 16
3.1.2 Esperto Qualificato: definizione e compiti.....	pag 16
3.1.3 Classificazione delle aree.....	pag 18
3.1.4 Classificazione dei lavoratori.....	pag 18
3.1.5 Norme interne di radioprotezione.....	pag 20
3.2 Operatività della sorveglianza sanitaria.....	pag 20
3.2.1 Sorveglianza Medica della Radioprotezione.....	pag 20
3.2.2 Visite, certificati di idoneità e loro significato.....	pag 21
3.3 Norme di comportamento dei lavoratori.....	pag 22
3.3.1 Schema riassuntivo degli obblighi dei lavoratori.....	pag 23

4. LA RADIOPROTEZIONE DEL PAZIENTE

4.1 I soggetti tutelati.....	pag 24
4.2 I principi fondamentali della radioprotezione del paziente.....	pag 24
4.3 I soggetti responsabili.....	pag 25
4.3.1 L' esercente.....	pag 26
4.3.2 Il responsabile dell'impianto radiologico.....	pag 26
4.3.3 Il medico specialista.....	pag 27

4.3.4 L'Esperto in Fisica Medica.....	pag 27
4.4 Il programma di garanzia della qualità.....	pag 28
4.5 I Livelli Diagnostici di Riferimento (LDR).....	pag 28
4.5.1 Trattamenti radiologici dei pazienti pediatrici.....	pag 29
4.5.2 Trattamenti radiologici delle donne in gravidanza.....	pag 30
4.5.3 Livelli Diagnostici di Riferimento in Medicina Nucleare.....	pag 30
4.5.4 Attività somministrate in pediatria e protezione del bambino.....	pag 31
4.5.5 Cautele per le donne in età fertile in Medicina Nucleare.....	pag 31
4.6 La protezione dei familiari dopo prestazioni medico-nucleari.....	pag 33

5. LA SICUREZZA IN UN IMPIANTO DI RISONANZA MAGNETICA

5.1 Campi magnetici statici.....	pag 34
5.1.1 Effetti.....	pag 34
5.1.2 Prescrizioni di sicurezza.....	pag 34
5.2 Campi magnetici variabili nel tempo.....	pag 35
5.2.1 Effetti.....	pag 35
5.2.2 Prescrizioni di sicurezza.....	pag 35
5.3 Campi a radiofrequenza.....	pag 35
5.3.1 Effetti.....	pag 35
5.3.2 Prescrizioni di sicurezza.....	pag 36
5.4 Rischi dovuti alla presenza e all'utilizzo di criogeni.....	pag 37

1. GENERALITÀ SULLE RADIAZIONI IONIZZANTI

Il termine radiazione viene abitualmente usato per descrivere fenomeni apparentemente assai diversi tra loro, quali l'emissione di luce da una lampada, di calore da una fiamma o di particelle elementari da una sorgente radioattiva. Caratteristica comune a tutti questi tipi di emissione è il trasporto di energia nello spazio. Questa energia viene ceduta quando la radiazione è assorbita nella materia. Ciò si può dimostrare constatando un aumento di temperatura in prossimità del punto in cui è avvenuto l'assorbimento.

L'aumento di temperatura non è però l'unico effetto prodotto dall'assorbimento di radiazione nella materia. Infatti, la luce può impressionare una lastra fotografica, il calore può generare un incendio e le particelle ionizzanti possono danneggiare l'organismo umano.

In base al loro comportamento, le radiazioni si distinguono in:

- **corpuscolari**, se al trasporto di energia è anche associato un trasporto di materia;
- **elettromagnetiche**, se il trasporto è solo di energia.

Un qualsiasi tipo di radiazione, indipendente dalla sua classificazione in elettromagnetica o corpuscolare, se è capace di produrre la ionizzazione degli atomi e delle molecole del mezzo attraversato è detta **RADIAZIONE IONIZZANTE**: in particolare essa può essere distinta in due tipologie :

- **direttamente ionizzante** se riferita a particelle cariche la cui energia è sufficiente a produrre ionizzazione per collisione (principalmente elettroni, protoni e alfa). Tali particelle, durante l'interazione con il mezzo attraversato, possono cedere parte o tutta la loro energia direttamente a uno degli elettroni dell'atomo urtato, ionizzandolo;
- **indirettamente ionizzante** se riferita a particelle prive di carica elettrica (raggi X, raggi gamma, neutroni) che, interagendo con la materia, possono mettere in moto particelle direttamente ionizzanti. I raggi X e γ possono causare ionizzazione per via diretta, ma in quantità trascurabile rispetto a quella riconducibile ai secondari carichi (fenomeno prevalente).

Per comprendere i fenomeni di interazione delle radiazioni ionizzanti nella materia è fondamentale conoscerne l'energia misurata, in fisica delle radiazioni, in elettronvolt (eV). Un elettronvolt è l'energia che una carica elementare (quella di un elettrone o di un protone) acquista attraversando una differenza di potenziale di 1 volt. Multipli sono il keV (10^3 eV), il MeV (10^6 eV) o il GeV (10^9 eV). A esempio, in un tubo a raggi X un elettrone, attraversando la differenza di potenziale di 100000 volt acquista una energia di 100000 eV (100 keV).

Quando un mezzo biologicamente significativo è esposto a un campo di radiazioni ionizzanti, diviene sede di un certo numero di processi, derivanti dal trasferimento di energia dalle particelle ionizzanti al mezzo, che si possono concludere con la manifestazione di un certo effetto. La relazione che intercorre tra tale effetto e le caratteristiche fisiche del campo di radiazioni costituisce la problematica fondamentale comune a molte discipline (radiobiologia, radioterapia, medicina nucleare, radiochimica e radioprotezione)

1.1 Grandezze e unità di misura delle radiazioni ionizzanti

Tutti gli effetti indotti dalle radiazioni ionizzanti si manifestano perché avviene una cessione di energia alla materia, da ciò la maniera più immediata per rappresentare le problematiche connesse è stata l'introduzione della grandezza fisica **dose assorbita**, definita come energia rilasciata nell'unità

di massa. Tale grandezza però, seppur comoda per dare una rappresentazione microscopicamente immediata del fenomeno, non è esaustiva per spiegare tutti i processi che stanno alla base della interazione della radiazione con i mezzi biologici.

Per meglio descrivere tali fenomeni, come la capacità delle radiazioni a ionizzare gli atomi e le molecole del mezzo irradiato, sono state introdotte, insieme alla dose assorbita, altre grandezze fisiche dette **dosimetriche**, in quanto utilizzate fondamentalmente in dosimetria cioè nella disciplina che si occupa della misura dell'energia ceduta dalla radiazione e assorbita dal corpo irradiato.

1.1.1 La dose media assorbita

Come detto, gli effetti delle radiazioni ionizzanti si manifestano soltanto allorché si verifica una cessione di energia al mezzo attraversato. In particolare, il danno subito dai tessuti biologici è in relazione all'energia assorbita per unità di massa. Di questa circostanza si tiene conto per mezzo della grandezza dosimetrica **dose media assorbita**, $D_{T,R}$ definita come il quoziente tra l'energia media ceduta dalla radiazione (R) nel tessuto o nell'organo (T) e la massa di materia contenuta in tale volume.

La dose media assorbita si misura in gray, **Gy**. Un gray corrisponde all'assorbimento di un joule in un kg di materia ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$).

Spesso vi è interesse a riferirsi alla dose assorbita per unità di tempo, ovvero all'intensità o rateo di dose assorbita, che si misura in Gy/s, o più usualmente in qualche sottomultiplo di questa unità, come a esempio il $\mu\text{Gy/h}$.

1.1.2 La dose equivalente

Il grado di rischio derivante dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti non è però solo proporzionale alla dose assorbita, ma è anche strettamente legato al tipo di radiazione incidente e alla radiosensibilità dei vari organi e tessuti irradiati.

Per tener conto della diversa "pericolosità" delle radiazioni incidenti, si introduce il cosiddetto *fattore di ponderazione delle radiazioni*, w_R . Si tratta di un parametro che tiene conto della "pericolosità" delle varie radiazioni rispetto alla radiazione di riferimento (fotoni), cui viene assegnato per definizione un w_R uguale a 1. Il prodotto della dose assorbita media in un organo o tessuto, $D_{T,R}$, per il fattore di ponderazione delle radiazioni, w_R , prende il nome di *dose equivalente nel tessuto od organo T*, e si indica con $H_{T,R}$ ($H_T = w_R D_{T,R}$). L'unità di misura della dose equivalente prende il nome di sievert (**Sv**). Nel caso dei fotoni e degli elettroni, $w_R=1$, e la dose assorbita di 1 Gy corrisponde alla dose equivalente di 1 Sv.

Sulla base degli esiti degli studi epidemiologici e di radiobiologia si è osservato che, a parità di dose assorbita, le particelle cariche pesanti (esempio le particelle alfa) con energia di alcuni MeV, producono un danno biologico molte volte maggiore rispetto ai fotoni (esempio, particelle alfa circa 20 volte maggiore). Pertanto, a queste particelle cariche pesanti, è stato assegnato un $w_R > 1$ (esempio, per le particelle alfa $w_R = 20$). Nel caso dell'esempio delle particelle alfa, alla dose assorbita di 1 Gy corrisponde, allora, per le particelle alfa, una dose equivalente di 20 Sv. Si parla di *intensità o rateo di dose equivalente* quando ci si riferisce alla dose equivalente ricevuta nell'unità di tempo. Essa si esprime in Sv/s o più comunemente in $\mu\text{Sv/h}$.

1.1.3 La dose efficace

Per tener conto della diversa radiosensibilità degli organi e tessuti del corpo umano per gli effetti stocastici si introduce la grandezza dosimetrica *dose efficace*, indicata solitamente con il simbolo E , definita come somma delle dosi equivalenti ponderate nei diversi organi e tessuti ciascuna moltiplicata per un fattore di ponderazione, w_T , che tiene appunto conto della diversa radiosensibilità degli organi e tessuti irraggiati. I valori assunti per i w_T sono riportati nell'Allegato IV del D.Lgs 230/95, ma sono stati aggiornati e sostituiti dalla pubblicazione 103 dell'ICRP (International Commission on Radiological Protection)

La grandezza dosimetrica dose efficace mette in relazione la quantità di radiazione ricevuta con il rischio a cui un individuo è esposto.

1.1.4 La dose impegnata

Quando si verifica un'introduzione di radionuclidi nel corpo umano (contaminazione interna) si deve tener conto che l'irraggiamento si protrarrà fin quando il radionuclide introdotto è presente nel corpo. La dose equivalente ricevuta da un certo organo o tessuto in tale periodo prende il nome di *dose equivalente impegnata*. Allo stesso modo, la dose efficace ricevuta in quel periodo prende il nome di *dose efficace impegnata*.

1.2 Irradiazione esterna e irradiazione interna

Lo scopo della dosimetria è quello di fornire una stima della dose efficace e della dose equivalente agli organi critici. La prima quantità è una grandezza complessa che tiene conto della qualità della radiazione, della dose equivalente ai differenti organi e della radiosensibilità degli stessi. Questa grandezza è utile in relazione agli effetti stocastici (sezione 2.2).

La dose equivalente è una grandezza, relativa al singolo organo, utile in relazione agli effetti deterministici (sezione 2.1). La dosimetria va diversificata in funzione della "geometria" di irradiazione se esterna o interna.

Si parla di irradiazione o esposizione esterna quando la sorgente di radiazioni resta all'esterno del corpo umano. Quando la sorgente viene invece introdotta nell'organismo (contaminazione interna) si parla di irradiazione o esposizione interna. La contaminazione interna può verificarsi tutte le volte che si manipolano sorgenti non sigillate, sorgenti cioè prive di un involucro inerte o, se presente, non tale da prevenire, in condizioni normali di impiego, la dispersione delle materie radioattive.

1.2.1 Irradiazione esterna

Nell'irradiazione esterna, l'organismo (o una sua parte) è irradiato con una o più sorgenti, che si trovano al di fuori di esso.

L'irradiazione esterna in ambito sanitario comprende:

- l'irradiazione da macchine radiogene (apparecchi per raggi X e acceleratori di particelle);
- l'irradiazione da sorgenti e materiali radioattivi.

Nell'irradiazione esterna numerose variabili e condizioni influenzano le dosi ricevute da oggetti o persone esposte. Per esempio, la geometria dell'irradiazione, vale a dire l'assetto spaziale (estensione, distanza, corpi e di schermi diffondenti), ha grande importanza.

La determinazione della dose efficace e della dose equivalente per l'irradiazione esterna (dosimetria esterna) si basa preferibilmente sulla determinazione del valore di grandezze dosimetriche, o a esse

collegabili, mediante strumenti utilizzati nel luogo ove si pensa che possa trovarsi l'organismo o il tessuto irradiato. Nella maggior parte di questi casi si effettuano, mediante specifica strumentazione (camera a ionizzazione, contatori geiger o contatori proporzionali), misure di grandezze operative correlate al valore di dose efficace ricercato (esposizione in aria, dose in aria, equivalente di dose ambientale, equivalente di dose personale). Queste misure forniscono informazioni abbastanza accurate sulla dose al lavoratore o alla popolazione qualora siano note le condizioni di irraggiamento. Una volta stimata la grandezza dosimetrica operativa d'interesse, il punto d'arrivo di ogni valutazione dosimetrica è rappresentato dalla valutazione della dose efficace a cui sono interessati i lavoratori o la popolazione da confrontare, poi, con i relativi valori limite definiti come standard di protezione.

Oltre alle misure di tipo ambientale con i rivelatori sopra citati, la determinazione della dose personale ai lavoratori esposti e alla popolazione avviene mediante due tipi di rivelamenti (monitoraggio): sugli individui (*dosimetria individuale*) e nell'ambiente di lavoro (*dosimetria ambientale*).

La valutazione della dose individuale ricevuta dai lavoratori viene di norma effettuata mediante dosimetri personali, le cui letture vengono integrate con i risultati della dosimetria ambientale. Le norme interne di radioprotezione specificano le circostanze nelle quali detti strumenti sono obbligatori. I controlli di cui trattasi vengono abitualmente effettuati con varie apparecchiature: dosimetri a termoluminescenza (cards, chips, bulbi), dosimetri individuali a lettura diretta, dosimetri individuali elettronici, rivelatori a tracce o dosimetri a film.

Per l'uso pratico di questi strumenti conviene ricordare che sono in vigore le norme di radioprotezione specifiche per l'impiego dei dosimetri personali.

La sorveglianza fisica ambientale (dosimetria ambientale) ha lo scopo di conseguire una "mappatura" in termini radioprotezionistici dei luoghi di lavoro da cui trarre elementi per una stima di dose individuale per il lavoratore che svolga le proprie mansioni in tali luoghi e delle persone del pubblico che possono stazionare in luoghi attigui. La dosimetria ambientale viene effettuata impiegando dosimetri ambientali lasciati sui luoghi frequentati dai lavoratori e/o dalla popolazione (campagna di dosimetria ambientale).

I provvedimenti da adottare per ridurre l'esposizione a irradiazione esterna limitando, quindi, le dosi ricevute sono piuttosto semplici e consistono nello:

- a) schermare la sorgente;
- b) aumentare la distanza tra sorgente e bersaglio;
- c) diminuire il tempo di esposizione alla sorgente.

1.2.2 Irradiazione interna

Nell'esposizione interna l'intero organismo, o una sua parte, è irradiato da sostanze radioattive (particelle α , particelle β , raggi γ) che sono state introdotte a seguito di inalazione, ingestione o ferita.

Per dosimetria interna si intende la **determinazione della dose** assorbita da un organismo, da un tessuto, da un apparato "bersaglio" specifico, oppure da tutto l'organismo, in conseguenza dell'incorporazione di uno o più radionuclidi. In ambito sanitario, gli ambienti di lavoro a rischio di contaminazione interna sono i luoghi in cui sono utilizzati radionuclidi per diagnosi e per terapia.

La valutazione della contaminazione interna è possibile tramite la stima del rischio radiologico da contaminazione interna (approccio teorico), il controllo routinario del personale (da risultati di

misure dirette e/o indirette sul lavoratore) e dal controllo eccezionale del personale in caso di incidente.

Le misure anche in questo contesto sono di tipo ambientale e vengono condotte rilevando la concentrazione di radioisotopi nell'aria, sulle superfici e sui filtri dei condizionamenti. Le misure individuali consistono nel rilevare esternamente la concentrazione del radioisotopo in uno specifico organo o nel corpo intero. Tali misuri restano attuabili soltanto se il radionuclide emette radiazioni gamma.

Qualora i radioisotopi emettano radiazioni alfa o beta è necessario ricorrere a misure indirette di concentrazione su escreti biologici. Attraverso la storia espositiva e la fisiologia degli organi interessati è possibile ricostruire la dose equivalente ed efficace impegnata.

Quindi, per una corretta determinazione della dose impegnata è necessario l'identificazione del radionuclide, la stima dell'attività incorporata, le conoscenze delle caratteristiche chimiche del contaminante e la comprensione del metabolismo del contaminante nell'organo "bersaglio".

Le regole di radioprotezione sopra indicate nel caso della irradiazione esterna, restano valide, per quanto applicabili, anche nel caso della manipolazione di sorgenti non sigillate. A esse si devono però aggiungere appropriate procedure di igiene del lavoro (uso di indumenti protettivi, barriere di contenimento, etc.) che rendano di fatto del tutto improbabile l'introduzione della contaminazione nell'organismo umano. Merita ricordare infatti che, in materia di contaminazione interna, l'unica misura realmente efficace è proprio quella di prevenire qualsiasi introduzione.

Inoltre, l'uso sistematico di indumenti (guanti monouso, soprascarpe, camici), non disgiunto da corrette norme procedurali, è di indubbia efficacia per la riduzione del rischio di contaminazione personale.

1.3 La penetrazione delle radiazioni ionizzanti nella materia

Le radiazioni ionizzanti propagandosi nello spazio possono incontrare materia, con la quale interagiscono. I meccanismi di interazione sono diversi a seconda del tipo di radiazione, della sua energia e delle caratteristiche del materiale attraversato. Ne segue una diversa capacità di penetrazione dei vari tipi di radiazioni nei vari materiali.

Per proteggerci dalle radiazioni che dall'esterno penetrano nel nostro corpo depositandovi energia, è importante conoscere:

- la capacità di penetrazione dei vari tipi di radiazione;
- la profondità di vari organi e tessuti importanti;
- la metodologia usata nella dosimetria da irradiazione esterna e del modo in cui si perviene a stime di dose assorbita dall'uomo.

1.3.1 Le particelle α

Le particelle alfa si caratterizzano per la produzione di una elevata densità di ionizzazione lungo le loro tracce. Il percorso nella materia di queste particelle è quindi sempre assai modesto. Esse possono essere arrestate in meno di 10 cm di aria oppure da un semplice foglio di carta. Solo se hanno una energia maggiore di circa 7 MeV sono in grado di superare lo spessore di 70 micrometri di tessuto e possono quindi raggiungere lo strato germinativo della cute provocando effetti biologici quali arrossamenti e eritema. Non sono pertanto molto pericolose fin quando la sorgente resta al di fuori dell'organismo umano (irradiazione esterna). Diventano, invece, estremamente pericolose, una

volta introdotte nell'organismo (irradiazione interna), in quanto tutta la loro energia viene allora ceduta agli organi e tessuti interni del corpo umano.

1.3.2 Particelle β ed elettroni accelerati

Le particelle beta e gli elettroni hanno una modesta capacità di penetrazione nella materia, ma i loro percorsi sono comunque assai maggiori di quelli delle particelle cariche pesanti (esempio, particella α). Elettroni da 1 MeV sono arrestati in 4 metri di aria o in 4 mm di acqua. Solo particelle con energie maggiori di 70 keV riescono a raggiungere lo strato germinativo della cute.

Quando si vogliono schermare le sorgenti di elettroni, conviene introdurre un primo strato di materiale leggero, al fine di ridurre l'intensità dei raggi X che queste particelle producono nella materia, cui far seguire un successivo strato di materiale pesante per ridurre i raggi X prodotti. E' importante, inoltre, ricordare che la dose assorbita massima si trova a profondità via via maggiori al crescere dell'energia delle particelle beta.

1.3.3 Fotoni X e gamma

Nel caso delle radiazioni indirettamente ionizzanti (le principali sono i raggi X, i raggi gamma e i neutroni), la cui penetrazione nella materia è assai maggiore delle particelle cariche, in considerazione della tipologia delle loro interazioni, non ha senso parlare di percorso nella materia.

La legge di attenuazione di un fascio di fotoni nel mezzo materiale è di tipo esponenziale decrescente. Da questo si desume che non è possibile stabilire un percorso in un mezzo o in uno strato di materia che riduca a zero il rateo di esposizione di un fascio fotonico, mentre si può stabilire un percorso o uno strato che lo riduca a una frazione del valore iniziale, comunque piccola. Per attenuare efficacemente le radiazioni X e gamma si devono usare materiali pesanti con elevato numero atomico Z, cioè ad alta densità elettronica, quali piombo, tungsteno o uranio.

Elementi con un numero atomico medio o basso quali acqua, plastica o legno possono, invece, aumentare la produzione e la diffusione di particelle secondarie cariche.

Nel caso dei RX impiegati in diagnostica, il massimo di dose viene rilasciato a livello dello strato germinativo e degli annessi cutanei quali i bulbi piliferi, le ghiandole sebacee e le ghiandole sudoripare; mentre tale massimo si sposta verso profondità maggiori rispetto a tali organi e tessuti, nel caso dei raggi gamma del Co-60 e dei fotoni di altissima energia. Queste ultime radiazioni "risparmiano" la cute da effetti biologici, pur rilasciando elevate dosi in profondità, per tali motivi trovano ampia applicazione in radioterapia.

1.3.4 Neutroni

I neutroni, infine, perdono energia tramite le interazioni con i nuclei degli atomi e i materiali attraversati. In un ampio intervallo di energia, tra circa 10 keV e 10 MeV, il principale meccanismo di interazione con la materia biologica è la diffusione elastica con la messa in moto di nuclei di rinculo, principalmente i protoni dell'idrogeno. A energie molto basse, al di sotto di 0,5 eV, prevalgono invece le reazioni di cattura da parte dei nuclei, con emissione di raggi gamma e altre particelle.

Per attenuare i fasci di neutroni i migliori materiali sono quelli con elevato contenuto di protoni e nuclei leggeri, quali acqua, paraffina e calcestruzzo.

2. EFFETTI BIOLOGICI DELLE RADIAZIONI IONIZZANTI

Gli effetti biologici dell'irradiazione costituiscono il prodotto finale di una lunga serie di fenomeni che hanno inizio con il passaggio della radiazione nel mezzo.

Gli eventi iniziali sono ionizzazioni ed eccitazioni di atomi e molecole del mezzo lungo le tracce delle particelle ionizzanti. Queste interazioni fisiche portano a reazioni chimico-fisiche, poi a reazioni chimiche e infine all'effetto biologico.

Infatti, il danno biologico è il risultato della deposizione di energia in alcuni bersagli critici. La ionizzazione è l'evento fisico indispensabile, mentre la localizzazione e la densità degli eventi determinano la gravità del danno biologico.

I danni prodotti dalle radiazioni ionizzanti sull'uomo possono essere distinti in tre categorie principali:

- a) danni somatici deterministici;
- b) danni somatici stocastici;
- c) danni genetici stocastici.

Si dicono *somatici* i danni che si manifestano nell'individuo irradiato, *genetici* quelli che si manifestano nella sua progenie.

2.1 Danni somatici deterministici

Per danni deterministici si intendono quelli la cui frequenza e gravità sono funzioni crescenti della dose e per i quali è possibile individuare un valore soglia. Essi sono conseguenti a una irradiazione di tutto il corpo, oppure localizzata in alcuni tessuti, che produce una inattivazione di tutto il corpo, oppure localizzata in alcuni tessuti, che produce una inattivazione cellulare tale da non poter essere compensata dalla proliferazione delle cellule che sopravvivono. La morte cellulare in questi casi può determinare una perdita di funzioni severa e clinicamente rilevabile in tessuto o organo, per cui la gravità del danno osservato è funzione della dose.

In particolare, i danni deterministici hanno in comune le seguenti caratteristiche:

- Si manifestano solo quando viene superata una dose soglia, caratteristica di ogni effetto e funzione della distribuzione temporale della dose;
- Oltre la dose soglia il verificarsi dell'effetto è certo, sia pure nell'ambito della variabilità individuale;
- Generalmente il periodo di latenza è breve (giorni o settimane), può in alcuni casi verificarsi un'insorgenza tardiva (qualche mese, alcuni anni);
- La gravità delle manifestazioni cliniche degli effetti aumenta con l'aumentare della dose.

Di grande importanza radioprotezionistica sono al riguardo i valori-soglia per i danni deterministici a carico di testicoli, ovaie, cristallino e midollo osseo, per l'esposizione singola di breve durata e per l'esposizione protratta e frazionata, sia annuale che totale (vedi tabella 2.1).

Oltre alle sedi indicate nella tabella 2.1, anche per le radiolesioni cutanee causate da esposizione acuta alle radiazioni ionizzanti, è possibile descrivere un quadro clinico che comprenda i vari tipi di alterazioni radioindotte con le relative dosi-soglia e gli andamenti evolutivi.

Nell'irradiazione cronica della pelle (specialmente in corrispondenza delle mani) l'esperienza clinica, acquisita soprattutto nella "fase eroica" della radiologia, ha dimostrato che sono necessarie dosi di qualche decimo di Gy alla settimana e per lunghi periodi (molti mesi, anni) per causare una radiodermite cronica ("cute del radiologo"), caratterizzata da cute secca e sottile, con verruche,

ispessimenti irregolari dello strato corneo, dilatazione dei capillari venosi, alterazioni delle unghie, stentata riparazione delle piccole ferite cutanee.

Tabella 2.1 - Stima nell'individuo adulto della soglia di dose per danni non stocastici a carico dei testicoli, delle ovaie, del cristallino e del midollo osseo

Tessuto ed effetto	Soglia di dose		
	Dose equivalente ricevuta in una singola breve esposizione (Sv)	Dose equivalente ricevuta per esposizioni fortemente frazionate o protratte (Sv)	Dose annuale se ricevuta per esposizioni fortemente frazionate o protratte per molti anni (Sv/anno)
Testicoli			
Sterilità temporanea	0,15	NA (a)	0,4
Sterilità permanente	3,5	NA	2,0
Ovaie			
Sterilità	2,5-6,0	6,0	> 0,2
Cristallino			
Opacità osservabili (b)	0,5-2,0	5,0	> 0,1
Deficit visivo (cataratta)	5,0	> 8,0	> 0,15
Midollo osseo			
Depressione dell'emopoiesi	0,5	NA	> 0,4
Aplasia mortale	1,5	NA	> 1

(a) NA indica "Non applicabile", in quanto la soglia dipende dall'intensità di dose più che dalla dose totale

(b) Opacità lenticolari appena osservabili

2.2 Danni somatici stocastici

I *danni somatici stocastici* comprendono le leucemie e i tumori solidi. Gli effetti stocastici si originano da una modificazione di cellule normali provocata da un evento di ionizzazione, che a basse dosi si ritiene abbia una bassa probabilità di verificarsi.

Per questo motivo nei danni somatici stocastici solo la probabilità di accadimento, e non la gravità, è funzione della dose; escludendo, cautelativamente, l'esistenza di dosi – soglia.

Danni di questo tipo hanno in particolare le seguenti caratteristiche:

- non richiedono il superamento di un valore-soglia di dose per la loro comparsa (ipotesi cautelativa ammessa per gli scopi preventivi della radioprotezione);
- sono a carattere probabilistico;
- sono distribuiti casualmente nella popolazione esposta;
- sono dimostrati dalla sperimentazione radiobiologica e dell'evidenza epidemiologica;
- la frequenza di comparsa è maggiore se le dosi sono elevate;
- si manifestano dopo anni, e talora decenni, dall'irradiazione;
- non mostrano gradualità con la dose ricevuta.

Per i danni stocastici, sulla base dei risultati degli studi epidemiologici sull'uomo, è assunta in radioprotezione una relazione dose-effetto di tipo lineare con estrapolazione passante per l'origine delle coordinate (assenza di soglia).

L'elaborazione della relazione dose-effetto è avvenuta nel corso degli anni sulla base di osservazioni epidemiologiche che riguardano esposizioni a dosi medio-alte (sopravvissuti giapponesi alle esplosioni atomiche, pazienti sottoposti a irradiazioni per scopi medici, esposizioni lavorative). I dati epidemiologici sono abbastanza numerosi per le alte dosi, sono piuttosto rari per le dosi medie e mancano per le piccole dosi.

L'assenza di evidenza epidemiologica alle basse dosi può essere correlata alla possibile inesistenza degli effetti radioindotti, oppure al "mascheramento" degli stessi che, pur presenti, non si rendono intellegibili sul piano epidemiologico perché compresi nelle fluttuazioni statistiche dell'incidenza "naturale" o "spontanea" dei tumori. Pertanto, la stima del rischio di ammalarsi di leucemia o di tumori radioindotti viene abitualmente effettuata estrapolando alle basse dosi i dati delle alte dosi. In seguito all'irradiazione è necessario considerare un periodo minimo di risposta clinicamente silente (latenza), seguito da un periodo a rischio, in cui è attesa la comparsa (a livello diagnostico) dei tumori dovuti alla radioinduzione.

2.3 Danni genetici stocastici

Non è stato possibile sinora rilevare con metodi epidemiologici un eccesso di malattie ereditarie nella progenie di soggetti esposti alle radiazioni ionizzanti rispetto alla progenie di soggetti non esposti. Lo studio radioepidemiologico più importante è stato quello sui discendenti dei sopravvissuti di Hiroshima e Nagasaki, nel corso del quale è stato effettuato un confronto tra bambini di cui almeno uno dei genitori era stato irradiato e bambini i cui genitori non erano stati irradiati. Nessuna differenza statisticamente significativa è apparsa tra i due gruppi per quanto concerne lo sviluppo psicofisico, le malformazioni di origine genetica e alcuni indicatori di natura citogenetica e biochimica.

Altre indagini condotte su popolazioni umane, per quanto di minore rilevanza, non hanno fatto evidenziare effetti genetici alla prima generazione. Sebbene non sia stato dimostrato a tutt'oggi nella specie umana che le radiazioni ionizzanti possono produrre danni ereditari, studi sperimentali su piante e animali indicano che tali danni possono di fatto insorgere. Il rischio genetico nell'uomo viene pertanto calcolato per estrapolazione partendo dalle sperimentazioni sugli animali da laboratorio.

2.4 Irradiazione in utero (embrione e feto)

L'embrione e il feto sono sensibili alle radiazioni ionizzanti e, come avviene anche nell'esposizione agli altri agenti fisici e ad agenti chimici, questa sensibilità è variabile in funzione dello stadio di sviluppo.

Prima dell'impianto dell'embrione, gli effetti di una irradiazione possono determinare la morte dell'embrione stesso (l'evento può passare inosservato perché la donna non sa ancora di essere incinta) o, in alternativa, non avere conseguenze sul suo sviluppo e sulla sopravvivenza postnatale, che possono quindi risultare del tutto normali (nello stadio di pre-impianto la morte di una o di alcune cellule, non ancora differenziate, può non essere grave).

Nel *periodo di morfogenesi*, si formano gli abbozzi dei vari organi e tessuti. In corrispondenza della fase di differenziazione e di organizzazione di ciascun tessuto è presente un'elevata radiosensibilità e in questa fase l'irradiazione può indurre più facilmente la comparsa di malformazioni.

Durante la *fase fetale* la frequenza e la gravità delle malformazioni diminuiscono, mentre risulta rilevante il rischio di uno sviluppo difettoso del sistema nervoso centrale che resta radiosensibile per una buona parte di questo periodo. In breve, malgrado la sensibilità dell'embrione e del feto all'irradiazione siano presenti in gradi molto variabili durante tutto il periodo di gestazione, lavori scientifici recenti confermano che il danno principale è il ritardo mentale. Non dovrebbe tuttavia essere apprezzabile alcun effetto sul quoziente di intelligenza fino a dosi dell'ordine di 0,1 Sv.

Nel periodo compreso tra la terza settimana dal concepimento e la fine della gestazione appare probabile che l'esposizione alle radiazioni possa determinare effetti stocastici che si esprimono come aumento della probabilità di neoplasie (soprattutto leucemie) in epoca post-natale. I dati disponibili, provenienti soprattutto da studi sulle madri sottoposte a esami radiodiagnostici in gravidanza, non sono univoci e sussistono notevoli incertezze interpretative.

3. LA RADIOPROTEZIONE DEL LAVORATORE E DELLA POPOLAZIONE

La radioprotezione o protezione sanitaria contro le radiazioni ionizzanti ha lo scopo di preservare lo stato di salute e benessere degli individui, della popolazione nel suo insieme, dei lavoratori e dei pazienti, riducendo i rischi sanitari da radiazioni ionizzanti nella realizzazione di attività umane che siano giustificate dai benefici che ne derivano alla società e ai suoi membri. Pertanto, in funzione di ciò, essa provvede anche alla tutela dell'ambiente.

La circostanza che nessuna esposizione alle radiazioni ionizzanti, per quanto modesta, possa essere considerata completamente sicura, ha spinto l'ICRP (International Commission on Radiological Protection) a raccomandare un sistema di protezione radiologica basato su tre fondamentali principi: *giustificazione della pratica, ottimizzazione della protezione e limitazione delle dosi individuali*. Detti principi sono stati pienamente recepiti nella normativa di legge italiana, attraverso l'Art. 2 del D.Lgs 230/95, che ne stabilisce il rispetto, nella disciplina delle attività con rischio da radiazioni ionizzanti, nei termini seguenti:

1. Nuovi tipi o nuove categorie di pratiche che comportano un'esposizione alle radiazioni ionizzanti debbono essere giustificati, anteriormente alla loro prima adozione o approvazione, dai loro vantaggi economici, sociali o di altro tipo rispetto al detrimento sanitario che ne può derivare (*principio di giustificazione*). I tipi o le categorie di pratiche esistenti sono sottoposti a verifica per quanto concerne gli aspetti di giustificazione ogniqualvolta emergano nuove e importanti prove della loro efficacia e delle loro conseguenze.
2. Qualsiasi pratica deve essere svolta in modo da mantenere l'esposizione al livello più basso ragionevolmente ottenibile, tenuto conto dei fattori economici e sociali (*principio di ottimizzazione*).
3. La somma delle dosi derivanti da tutte le pratiche non deve superare i limiti di dose stabiliti per i lavoratori esposti, gli apprendisti, gli studenti e gli individui della popolazione (*limitazione della dose*).

Secondo il *principio di giustificazione* della pratica non si devono adottare pratiche che determinano esposizione alle radiazioni, a meno che esse non producano beneficio sufficiente per gli individui esposti o per la società tali da sopravanzare il danno determinato dalla radiazione.

Parimenti, il *principio di ottimizzazione* sancisce che ogni esposizione a radiazioni deve essere tenuta tanto bassa quanto è ragionevolmente ottenibile (noto anche come principio A.L.A.R.A. "As Low Reasonably Achievable") tenendo conto di considerazioni economiche e sociali. In questo principio è considerata l'esposizione collettiva che è indicativa del detrimento sanitario della popolazione, cioè dell'attesa di danni stocastici conseguenti all'esposizione, prendendo in considerazione sia la probabilità che la gravità della stessa.

Attraverso il principio ALARA vengono di fatto stabiliti gli obiettivi di radioprotezione da osservare nelle varie attività e, con questi, gli effettivi valori delle dosi che riceveranno i lavoratori e le persone del pubblico, di norma assai più modesti dei limiti individuali fissati con il *principio di limitazione delle dosi*, che viene così a rappresentare soltanto un'ulteriore garanzia per gli individui esposti. In una pratica appropriatamente ottimizzata raramente le dosi ricevute dai lavoratori potranno eccedere una modesta frazione dei limiti individuali raccomandati.

3.1 Strumenti operativi di sorveglianza fisica della radioprotezione

Il conseguimento degli obiettivi del sistema di protezione radiologica sopra descritto (prevenzione dei danni deterministici e limitazione degli eventi stocastici) sono demandati all'organizzazione della radioprotezione e in particolare alle azioni della sorveglianza fisica e medica della radioprotezione. La sorveglianza fisica viene assicurata dal **Datore di Lavoro** tramite la figura professionale dell'**Esperto Qualificato**, e la sorveglianza medica tramite il medico addetto alla sorveglianza medica (**Medico Autorizzato** e/o **Medico Competente**).

3.1.1 Datore di lavoro: definizione e compiti

L'art.2 (comma 1, lett. b)) del D.Lgs 81/08 definisce come datore di lavoro "Il soggetto titolare del rapporto di lavoro con il lavoratore o, comunque, il soggetto che, secondo il tipo e l'assetto dell'organizzazione nel cui ambito il lavoratore presta la propria attività, ha la responsabilità dell'organizzazione stessa o dell'unità produttiva in quanto esercita i poteri decisionali e di spesa. Secondo l'art. 61 del D.Lgs 230/95 in relazione alla radioprotezione, il datore di lavoro, unitamente ai Dirigenti e ai Preposti, è chiamato a:

- Fornire all'Esperto Qualificato tutte le informazioni necessarie perché il professionista rediga una relazione scritta contenente le valutazioni e le indicazioni di radioprotezione;
- Provvedere affinché gli ambienti di lavoro in cui sussista un rischio (da radiazioni) siano individuati, classificati, delimitati e segnalati;
- Provvedere affinché i lavoratori interessati siano classificati;
- Predisporre norme interne di protezione e sicurezza adeguate al rischio e cura che copia di dette norme sia consultabile nei luoghi frequentati dai lavoratori e in particolare nelle zone controllate.
- Fornire al lavoratore, ove necessari, i mezzi di sorveglianza dosimetrica e di protezione, in relazione ai rischi cui sono esposti;
- Rendere edotti i lavoratori nell'ambito di un programma di formazione, finalizzato alla radioprotezione dei rischi specifici a cui sono esposti, delle norme di protezione sanitaria, delle conseguenze derivanti dalla mancata osservanza delle prescrizioni mediche, delle modalità di esecuzione del lavoro e delle norme interne di protezione e sicurezza;
- Provvedere affinché i singoli lavoratori osservino le norme interne di protezione e sicurezza, usino i mezzi di sorveglianza dosimetrica e di protezione, osservino le modalità di esecuzione del lavoro divulgate al momento formativo;
- Provvedere affinché siano apposte segnalazioni che indichino il tipo di zona, la natura delle sorgenti, e i relativi tipi di rischio e siano indicate, mediante appositi contrassegni, le sorgenti di radiazioni ionizzanti, fatta eccezione per quelle non sigillate in corso di manipolazione;
- Fornire al lavoratore esposto i risultati delle valutazioni di dose effettuate dall'esperto qualificato, che lo riguardano direttamente, nonché assicurare l'accesso alla documentazione di sorveglianza Fisica.

3.1.2 Esperto Qualificato: definizione e compiti

L'esperto qualificato è persona che possiede le cognizioni e l'addestramento necessari per misurare le radiazioni ionizzanti, per assicurare l'esatto funzionamento dei dispositivi di protezione, per dare le istruzioni e le prescrizioni necessarie a garantire la sorveglianza fisica della radioprotezione.

In questa sua veste fornisce al datore di lavoro, prima dell'inizio di qualsiasi attività con rischio da radiazioni ionizzanti, una consulenza in merito alla valutazione dei rischi che l'attività comporta e ai relativi provvedimenti di radioprotezione da adottare, redigendo apposita relazione.

Rientrano tra le competenze autonome dell'esperto qualificato, o di collaborazione nei confronti del datore di lavoro, una serie di fondamentali azioni organizzative generali, le principali delle quali riguardano:

- l'individuazione e la classificazione delle aree ove sussiste il rischio da radiazioni ionizzanti;
- la classificazione dei lavoratori ai fini della radioprotezione addetti, previa definizioni da parte del datore di lavoro delle attività che questi devono svolgere;
- i provvedimenti di cui ritenga necessaria l'adozione per assicurare la sorveglianza fisica dei lavoratori;
- la predisposizione delle norme interne di radioprotezione;
- la segnalazione mediante contrassegni delle sorgenti di radiazione;
- la predisposizione di un programma di informazione e formazione, finalizzato alla radioprotezione, allo scopo di rendere il personale edotto dei rischi specifici a cui è esposto.

Nell'ambito dell'esercizio dei propri compiti, l'esperto qualificato deve, inoltre:

- effettuare una valutazione della radioprotezione degli ambienti dove sono installate apparecchiature emittenti radiazioni ionizzanti;
- procedere alla valutazione sia in fase di progetto che di esercizio delle dosi ricevute o impegnate dai gruppi di riferimento della popolazione, in condizioni normali di lavoro e nel caso di incidenti;
- attuare la verifica delle attrezzature con esame preventivo e rilascio di benestare dei progetti di installazione di apparecchiature e loro ubicazione con verifica di prima installazione, modifiche, verifica periodica di radioprotezione, calcolo e indicazione di sistemi di radioprotezione (barriere fisse e mobili);
- verificare periodicamente l'efficacia dei dispositivi ovvero delle tecniche di radioprotezione e le buone condizioni di funzionamento degli strumenti di misurazione;
- effettuare la sorveglianza ambientale di radioprotezione (dosimetria ambientale);
- valutare le dosi ricevute dai lavoratori e le introduzioni dei radionuclidi;
- assegnare ai lavoratori dei dosimetri individuali;
- determinare le dosi ricevute o impegnate dei lavoratori esposti (scheda dosimetrica);
- accertare, nelle aree controllate, la presenza di idonei sistemi di protezione individuale (camici, guanti, occhiali).

Nella determinazione della dosimetria individuale, la valutazione delle dosi ricevute o impegnate deve essere eseguita mediante uno o più apparecchi di misura individuale nonché in base ai risultati della sorveglianza ambientale. Per i lavoratori con esposizioni interne, la suddetta valutazione deve essere eseguita in base a metodi fisici e/o tossicologici. Qualora avvalersi di metodi sopradetti risultasse impossibile o insufficiente, la valutazione potrà essere effettuata sulla scorta della valutazione dell'ambiente di lavoro o a partire alle misurazioni compiute su altri lavoratori esposti.

Secondo le attuali disposizioni di legge (D.Lgs 230/95), il monitoraggio individuale (dosimetria personale) risulta obbligatorio esclusivamente per lavoratori esposti di "categoria A" (sezione 3.1.4) a mezzo di dosimetri personali. Il monitoraggio individuale è facoltativo per i lavoratori esposti di categoria B. In questo ultimo caso la dose da attribuire ai lavoratori può essere determinata sulla scorta dei risultati di sorveglianza ambientale.

L'esperto qualificato comunica per iscritto al Medico Autorizzato almeno ogni 6 mesi le dosi ricevute dai lavoratori di categoria A e con periodicità annuale quelle degli altri lavoratori esposti. In caso di esposizioni accidentali o di emergenza, la comunicazione delle misurazioni basate sui dati disponibili deve essere immediata e, ove necessario, tempestivamente aggiornata.

Il datore di lavoro si assicura che l'esperto qualificato trasmetta al medico addetto alla sorveglianza i risultati delle valutazioni dosimetriche relative ai lavoratori esposti e garantisce le condizioni per la collaborazione tra l'Esperto Qualificato e il Servizio Prevenzione e Protezione.

3.1.3 Classificazione delle aree

Nel D.Lgs 230/95 si parla di *zone classificate* per gli ambienti di lavoro sottoposti a regolamentazione per motivi di protezione contro le radiazioni ionizzanti. Le zone classificate possono essere *zone controllate* o *zone sorvegliate*.

È classificata zona controllata ogni area di lavoro ove sussiste per i lavoratori ivi operanti il rischio di superamento di uno qualsiasi dei seguenti valori:

6 mSv/anno per la dose efficace;

45 mSv/anno per la dose equivalente al cristallino;

150 mSv/anno per la dose equivalente a pelle, mani, avambracci, piedi, caviglie.

È classificata zona sorvegliata ogni area di lavoro, che non debba essere classificata zona controllata, ove sussiste per i lavoratori ivi operanti il rischio di superamento di uno qualsiasi dei seguenti valori:

1 mSv/anno per la dose efficace;

15 mSv/anno per la dose equivalente al cristallino;

50 mSv/anno per la dose equivalente alla pelle.

Nell'accertamento delle condizioni di cui sopra, l'esperto qualificato deve tener conto anche delle esposizioni potenziali conseguenti a eventi anomali e a malfunzionamenti che siano suscettibili di aumentare le dosi derivanti dalla normale attività lavorativa programmata.

L'individuazione e la classificazione delle aree ove sussiste rischio da radiazioni deve essere indicata per mezzo di relazione scritta al datore di lavoro ai sensi dell'art. 80, lettera a).

Le zone controllate e sorvegliate sono segnalate mediante idonei cartelli di segnalazione posti in corrispondenza degli accessi.

3.1.4 Classificazione dei lavoratori

Il D.Lgs 230/95 prevede diversi adempimenti di sorveglianza fisica e medica a seconda della categoria in cui i lavoratori esposti al rischio da radiazioni ionizzanti vengono classificati. La classificazione di radioprotezione è quindi un'operazione preliminare, indispensabile per una corretta programmazione delle azioni di radioprotezione, e come tale deve essere effettuata prima di adibire il personale alle attività con rischio da radiazioni.

La classificazione di radioprotezione deve essere formulata dall'esperto qualificato, tenuto conto di tutte le attività svolte dal lavoratore per conto del datore di lavoro. La classificazione di radioprotezione viene formulata per mezzo della scheda di radioprotezione sulla base delle condizioni di lavoro come definite dal datore di lavoro. La scheda di radioprotezione deve essere quindi compilata prima che il lavoratore sia adibito alle attività lavorative con rischio da radiazioni ionizzanti (Regolamento interno di radioprotezione).

Sulla base del D.Lgs 230/95, i lavoratori sono distinti in lavoratori esposti e lavoratori non esposti.

Sono classificati come ***lavoratori esposti*** i soggetti che, in ragione dell'attività svolta per conto del datore di lavoro, *sono suscettibili* di una esposizione alle radiazioni ionizzanti superiore a uno qualsiasi dei limiti per le persone del pubblico, ovvero:

- 1 mSv per quanto riguarda la dose efficace
- uno qualsiasi dei seguenti limiti di dose equivalente:
 - 15 mSv per il cristallino
 - 50 mSv per la pelle: se l'esposizione risulta da una contaminazione radioattiva cutanea, tale limite si applica alla dose media su qualsiasi superficie di 1 cm² ;
 - 50 mSv per mani, avambracci, piede e caviglie.

Sono considerati ***lavoratori non esposti*** i soggetti sottoposti, in ragione dell'attività svolta per il datore di lavoro, a una esposizione non superiore a uno qualsiasi dei limiti fissati per le persone del pubblico (vedi valori precedenti).

Tra i lavoratori esposti vi è un'ulteriore suddivisione in due categorie: **A** e **B**.

Sono classificati in categoria A i lavoratori esposti che, sulla base degli accertamenti compiuti dall'esperto qualificato, sono suscettibili di un'esposizione superiore, in un anno solare, a uno dei seguenti valori:

- 6 mSv per quanto riguarda la dose efficace
- uno qualsiasi dei seguenti limiti di dose equivalente:
 - 45 mSv per il cristallino;
 - 150 mSv per la pelle: se l'esposizione risulta da una contaminazione radioattiva cutanea, tale limite si applica alla dose media su qualsiasi superficie di 1 cm²;
 - 150 mSv per mani, avambracci, piede e caviglie.

I lavoratori esposti non classificati in categoria A sono classificati in categoria B.

Nell'accertamento delle condizioni di appartenenza all'una o all'altra delle due categorie, l'esperto qualificato deve tener conto anche delle esposizioni potenziali conseguenti a eventi anomali e a malfunzionamenti che siano suscettibili di aumentare le dosi derivanti dalla normale attività lavorativa programmata.

Per tutti i lavoratori classificati esposti siano essi di categoria A o B valgono i seguenti limiti di dose:

- il limite di dose efficace è stabilito in 20 mSv in un anno solare. In caso di superamento per situazioni accidentali e di emergenza o soggette ad autorizzazioni speciali, le successive esposizioni, per l'anno solare devono essere limitate a 10 mSv sino a quando la media annuale, per tutti gli anni solari a venire, incluso quello del superamento risulti non superiore a 20 mSv.
- devono altresì essere rispettati, in un anno solare, i seguenti limiti di dose equivalente:
 - 150 mSv per il cristallino;
 - 500 mSv per la pelle (tale limite si applica alla dose media, su qualsiasi superficie di 1 cm² indipendentemente dalla superficie esposta);
 - 500 mSv per mani, avambracci, piede e caviglie.
- Le donne gestanti non possono svolgere attività in zone classificate o, comunque, ad attività che potrebbero esporre il nascituro a una dose che ecceda 1 mSv durante il periodo di gravidanza. Le donne che allattano non devono essere adibite ad attività comportanti un rischio di contaminazione. ***Per le donne in stato di gravidanza fare comunque riferimento al D. Lgs. 151/2001***

I lavoratori esposti non possono essere adibiti ad attività con rischio da radiazioni ionizzanti fino a quando il medico addetto alla sorveglianza medica non abbia rilasciato il relativo giudizio di idoneità, sulla base delle risultanze della visita medica preventiva. Il giudizio di idoneità deve poi essere confermato nelle successive visite periodiche.

Tutto il personale esposto al rischio da radiazioni ionizzanti deve inoltre essere preventivamente reso edotto, nell'ambito di un programma di formazione finalizzato alla radioprotezione, dei rischi specifici cui è esposto, delle norme di protezione sanitaria, delle conseguenze derivanti dalla mancata osservanza delle prescrizioni mediche, delle modalità di esecuzione del lavoro e delle norme interne di radioprotezione.

3.1.5 Norme interne di radioprotezione

Le norme interne di radioprotezione sono lo strumento per mezzo del quale vengono disciplinate le attività radiologiche intorno a ciascun impianto o sorgente di radiazioni. In esse vengono, in particolare, specificate le regole da seguire per l'accesso e la permanenza nelle zone classificate ovvero per la manipolazione e l'utilizzo delle sorgenti radioattive. Le norme interne sono predisposte dall'esperto qualificato ed emanate dal datore di lavoro. I lavoratori sono tenuti ad osservare le disposizioni in esse contenute. Copia delle norme interne di protezione e sicurezza, specifiche per ogni sito, è disponibile all'interno dei luoghi di lavoro interessati.

3.2 Operatività della sorveglianza sanitaria

L'art. 83 del D.Lgs 230/95 regola la sorveglianza medica della radioprotezione, che può essere così riassunta:

il datore di lavoro deve provvedere ad assicurare mediante uno o più medici la sorveglianza medica dei lavoratori esposti. Tale sorveglianza è basata sui principi che disciplinano la medicina del lavoro e per i lavoratori in categoria A è assicurata tramite i medici autorizzati, per i lavoratori in categoria B dai medici autorizzati o competenti.

Il datore di lavoro deve assicurare a tali medici le condizioni necessarie per lo svolgimento dei loro compiti e l'accesso a informazioni e documentazioni che questi ritengono necessarie per la valutazione dello stato di salute dei lavoratori esposti e delle condizioni di lavoro incidenti sotto il profilo medico sul giudizio di idoneità dei lavoratori. Il datore di lavoro non può assegnare alcun lavoratore ad attività che li esponga a rischio di radiazioni ionizzanti qualora le conclusioni mediche vi si oppongano.

3.2.1 Sorveglianza Medica della Radioprotezione

In conformità al D.Lgs 230/95 scopo primario della sorveglianza medica ai lavoratori radioesposti è appunto la valutazione dello stato generale di salute confrontato con le condizioni di lavoro che possono incidere, sotto il profilo sanitario, sull'idoneità al lavoro specifico.

Essa viene affidata al Medico Autorizzato per gli esposti di categoria A e al Medico Autorizzato o al Medico Competente per gli esposti di categoria B.

La sorveglianza medica deve intendersi finalizzata:

1. alla verifica della compatibilità dello stato di salute del lavoratore, valutato opportunamente, con le specifiche condizioni di lavoro;

2. all'acquisizione di dati di riferimento utili in caso di sovraesposizione accidentale; alla diagnosi precoce di una malattia professionale o presunta tale, anche attraverso il confronto con i suddetti dati di riferimento.

L'attività del medico nell'ambito del lavoro deve mantenere e promuovere la salute delle persone sane che lavorano attraverso criteri e procedimenti sanitari che possono essere diversi da quelli seguiti nella medicina clinico assistenziale.

A tal fine, accanto al profilo diagnostico di base dello stato generale del lavoratore, è necessario individuare, attraverso una valutazione della radiopatologia attesa, gli ulteriori aspetti clinici coerenti con la sorveglianza medica della radioprotezione.

3.2.2 Visite, certificati di idoneità e loro significato

Il controllo medico dei lavoratori professionalmente esposti a radiazioni ionizzante è regolato dagli Artt. 84, 85, 86, 89, 92 e 95 ed è affidato, da parte del Datore di lavoro, al Medico Autorizzato o al Medico Competente, la cui competenza professionale è regolata da D.Lgs 230/95.

Il controllo sanitario viene effettuato mediante l'esecuzione di visita medica preventiva che deve essere preceduta da una informazione, da parte del Datore di Lavoro al Medico Autorizzato, concernente le mansioni e i rischi ad esse connessi che verranno attribuite al lavoratore. Tale visita, in quanto "Visita di Medicina Preventiva" connessa con l'attività lavorativa, ha il significato di individuare le condizioni cliniche e psichiche del lavoratore in relazione alle mansioni, con particolare riferimento ai rischi di esposizione a radiazioni ionizzanti.

Pertanto, oltre al controllo anamnestico, verranno eseguite indagini di laboratorio atte alla formulazione completa di un giudizio sull'idoneità del lavoratore. Al termine della visita il medico emetterà un giudizio di:

- Idoneo
- Idoneo a determinate condizioni
- Non idoneo

Tale giudizio viene comunicato al datore di lavoro e al lavoratore al quale verranno inoltre indicate le precauzioni che dovrà osservare nell'utilizzo delle radiazioni.

Il controllo sanitario verrà effettuato con successive visite di controllo che, in base alla classificazione dei lavoratori avranno una cadenza annuale o semestrale.

Anche per queste visite saranno necessari esami di laboratorio, di diagnostica per immagini o visite specialistiche secondo l'indicazione del Medico. In base alla risultanza della visita periodica i lavoratori verranno classificati in :

- Idoneo
- Idoneo a determinate condizioni
- Non idoneo

Al termine dell'attività lavorativa comportante mansioni con utilizzo di radiazioni ionizzanti il lavoratore sarà sottoposto a visita medica di chiusura con l'emissione di un giudizio:

- Idoneo
- Idoneo a determinate condizioni
- Non idoneo

I lavoratori potranno essere sottoposti a sorveglianza sanitaria anche dopo la cessazione del lavoro che li ha esposti a radiazioni ionizzanti.

Quando il Medico emette giudizio di “non idoneità”, il Datore di Lavoro ha l’obbligo di allontanamento immediato del lavoratore dalle attività con rischio da radiazioni ionizzanti. Il lavoratore non potrà essere nuovamente adibito a tali mansioni prima di eventuale visita del medico che ne accerti l’idoneità.

Per ogni lavoratore il Medico Autorizzato o Competente è tenuto a mantenere aggiornato un documento sanitario personale elaborato secondo le modalità definite dal D.Lgs 230/95 nel quale verranno annotate le notizie cliniche e la dosimetria personale durante l’attività del lavoratore. Al termine dell’attività lavorativa con radiazioni ionizzanti il Medico Autorizzato è tenuto a consegnare la cartella all’ISPESL, può essere utile conservare una copia a cura del datore di Lavoro.

Sarà fatto obbligo inoltre di osservare le norme interne relative alla sicurezza nella radioprotezione, in relazione alle mansioni cui addetti.

Va fatto particolare riferimento all’obbligo dell’utilizzo dei dosimetri e dei DPI forniti dal Datore di Lavoro su indicazioni dell’Esperto Qualificato.

3.3 Norme di comportamento dei lavoratori

Gli obblighi cui sono tenuti i lavoratori possono essere così riassunti:

Art. 68 del D.Lgs 230/95

1) I lavoratori devono:

- a) osservare le disposizioni impartite dal Datore di Lavoro, o dai suoi incaricati, ai fini della protezione individuale e collettiva e della sicurezza, a seconda delle mansioni alle quali sono addetti;
- b) usare secondo le specifiche istruzioni i dispositivi di sicurezza, i mezzi di protezione e di sorveglianza dosimetrica predisposti o forniti dal Datore di Lavoro;
- c) segnalare immediatamente al Datore di Lavoro, al dirigente o al preposto le deficienze dei dispositivi e dei mezzi di sicurezza, di protezione e di sorveglianza dosimetrica, nonché le eventuali condizioni di pericolo di cui vengono a conoscenza;
- d) non rimuovere né modificare, senza averne ottenuta l’autorizzazione, i dispositivi e gli altri mezzi di sicurezza, di segnalazione, di protezione e di misurazione;
- e) non compiere, di propria iniziativa, operazioni o manovre che non sono di loro competenza o che possono compromettere la protezione e la sicurezza;
- f) sottoporsi alla sorveglianza medica.

2) I lavoratori che svolgono, per più Datori di Lavoro, attività che li espongono al rischio da radiazioni ionizzanti, devono rendere edotto ciascun Datore di Lavoro delle attività svolte presso gli altri.

Art. 68 bis del D.Lgs 230/95

Su motivata richiesta il lavoratore deve trasmettere, ai soggetti titolari di incarichi di sorveglianza fisica e medica della radioprotezione, le informazioni relative alle dosi pregresse ricevute.

La tutela delle lavoratrici in gravidanza è prevista dal D.Lgs 151/01 e dal D. Lgs 230/95 di cui l’Art. 69 comma 1, *“le donne gestanti non possono svolgere attività in zone classificate o, comunque, attività che potrebbero esporre il nascituro ad una dose che ecceda un mSv durante il periodo della gravidanza”*

L’iter operativo della tutela delle lavoratrici in gravidanza è il seguente:

- 1) la lavoratrice che svolge attività comportante rischio da radiazioni ionizzanti è tenuta (art.69 comma 2) a comunicare il proprio stato di gravidanza, non appena accertato, al Datore di Lavoro e al Dirigente/Responsabile dell'U.O. di appartenenza;
- 2) Il Datore di Lavoro comunica tempestivamente all'Esperto Qualificato e al Medico Autorizzato lo stato di gravidanza della lavoratrice;
- 3) Il Dirigente dell'U.O. in cui la lavoratrice presta servizio, la esonera immediatamente, in via cautelativa, da ogni attività comportante esposizione alle radiazioni ionizzanti, in attesa del giudizio di idoneità espresso dal Medico Autorizzato.

Inoltre, è preferibile che:

- 1) Il Datore di Lavoro invii la lavoratrice al Medico Autorizzato;
- 2) Il Medico Autorizzato al termine della visita esprima il giudizio di non idoneità temporanea ad attività professionale con esposizione a radiazioni ionizzanti, per gravidanza, allegando la certificazione di gravidanza al documento sanitario personale, e chieda l'allontanamento della lavoratrice dal lavoro comportante esposizione alle radiazioni ionizzanti;
- 3) Copia del giudizio di idoneità venga rilasciata alla dipendente all'atto della visita e copia venga successivamente trasmessa al Datore di Lavoro.

La lavoratrice che sospende l'attività comportante esposizione alle radiazioni ionizzanti riconsegna, al termine dell'ultimo giorno lavorativo in qualità di professionalmente esposta alle radiazioni ionizzanti, al Servizio di Fisica Sanitaria i dosimetri personali a Lei assegnati.

Durante l'allattamento, la lavoratrice non dovrà essere a contatto con i radioisotopi. Al rientro dal congedo per maternità la lavoratrice dovrà essere sottoposta a visita dal Medico Autorizzato prima di riprendere l'esposizione a Radiazioni Ionizzanti.

3.3.1 Schema riassuntivo degli obblighi dei lavoratori

1. Sottoporsi a visita medica preventiva prima dell'esposizione;
2. Ottenuto il certificato di idoneità acquisire il dosimetro e utilizzarlo secondo le direttive dell'Esperto Qualificato;
3. Utilizzare i dispositivi di protezione individuale durante l'attività lavorativa (guanti, camici, occhiali, ecc.), ovvero segnalare immediatamente le loro deficienze;
4. Segnalare il distacco dei dosimetri ambientali, qualora presenti e il mal funzionamento dei sistemi di monitoraggio ambientale e individuali;
5. Attenersi alle norme di radioprotezione individuale e del paziente durante l'effettuazione degli esami;
6. Segnalare le carenze in merito ai sistemi di protezione ambientali;
7. Sottoporsi alle visite mediche di controllo con cadenza semestrale o annuale;
8. Sottoporsi a visita medica di chiusura al termine dell'attività comportante esposizione a radiazioni ionizzanti;
9. Le lavoratrici devono immediatamente comunicare lo stato di gravidanza al primo accertamento e rispettare le norme di allontanamento dal lavoro data la non idoneità che lo stato di gravidanza comporta.

4. LA RADIOPROTEZIONE DEL PAZIENTE

Uno degli aspetti rilevanti dell'attuale legislazione (D. Lgs. 187/2000) relativa alla protezione sanitaria delle persone contro i pericoli delle radiazioni ionizzanti connesse a esposizione mediche è rappresentato dall'attenzione particolare rivolta allo sviluppo e messa in opera di programmi di Garanzia della Qualità, i cui obiettivi sono quelli di garantire la precisione diagnostica e, contemporaneamente, contenere il più possibile la dose impartita alla popolazione.

L'introduzione del concetto di "Garanzia della qualità" consente oggi di perseguire la qualità, non solo relativamente alle prestazioni delle apparecchiature, ma anche in relazione a quello che è il rapporto globale che intercorre, nelle sue varie fasi, tra il paziente e la struttura sanitaria ove viene effettuato l'esame diagnostico e/o il trattamento terapeutico.

4.1 I soggetti tutelati

I soggetti tutelati dai rischi derivanti dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti nell'ambito di indagini o trattamenti medici con l'ausilio di apparecchiature radiologiche o di materiali radioattivi, sono:

- Il paziente nelle attività mediche e il lavoratore in quanto paziente nell'ambito della sorveglianza sanitaria sulla sicurezza del lavoro;
- Volontari o familiari che assistono persone sottoposte a esposizioni mediche presso l'impianto ovvero a domicilio (es. pazienti sottoposti a esami di medicina nucleare);
- Persone sane o pazienti che partecipano volontariamente a programmi di ricerca medica o biomedica, in campo diagnostico e terapeutico;
- Persone esposte nell'ambito di procedure medico-legali (anche senza indicazione clinica).

Tra i soggetti tutelati, le donne in stato di gravidanza o allattamento e i bambini hanno un'attenzione particolare. Per ciascuna categoria, non potendosi definire limiti di dose come per i lavoratori (vedi sezione 3.1.4), sono previsti livelli di dose di riferimento e vincoli di dose per la pianificazione della radioprotezione del paziente.

4.2 I principi fondamentali della radioprotezione del paziente

La protezione del paziente deve avvenire nel rispetto dei *principi di giustificazione* e di *ottimizzazione delle pratiche radiologiche* che fanno parte di un corretto uso delle radiazioni ionizzanti.

In particolare, il *principio di giustificazione* stabilisce che:

- 1) E' vietata l'esposizione non giustificata;
- 2) Le esposizioni mediche devono mostrare di essere sufficientemente efficaci mediante la valutazione dei potenziali vantaggi diagnostici o terapeutici complessivi da esse prodotti inclusi i benefici diretti per la salute della persona e della collettività, rispetto al danno alla persona che l'esposizione potrebbe causare, tenendo conto dell'efficacia, dei vantaggi e dei rischi di tecniche alternative disponibili, che si propongono lo stesso obiettivo, ma che non comportano un'esposizione, ovvero comportano una minore esposizione alle radiazioni ionizzanti;
- 3) Il D. Lgs. 187/2000 individua due diverse situazioni: la pratica, che deve essere giustificata generalmente, e la singola esposizione, che deve essere giustificata specificamente nel contesto scientifico e personale in cui viene programmata;

- 4) Tutte le esposizioni mediche individuali devono essere giustificate preliminarmente, tenendo conto degli obiettivi specifici dell'esposizione e delle caratteristiche della persona interessata. Se un tipo di pratica che comporta un'esposizione medica non è giustificata in generale, può essere giustificata invece per il singolo individuo in circostanze da valutare caso per caso;
- 5) Il prescrittente e lo specialista, per evitare esposizioni non necessarie, si avvalgono delle informazioni acquisite o si assicurano di essere in grado di procurarsi precedenti informazioni diagnostiche o documentazione medica pertinenti alla prevista esposizione;
- 6) Le esposizioni di soggetti che al di fuori della propria occupazione, assistono o confortano persone sottoposte a esposizioni mediche devono essere sottoposte a una particolare procedura di giustificazione. E' obbligatorio l'uso di idonei mezzi di protezione, ove tali esposizioni sono comunque vietate nei confronti dei minori di 18 anni e delle donne con gravidanza in atto.

Il principio di ottimizzazione richiede che, una volta che la pratica radiologica sia stata giustificata, esse venga effettuata in maniera di rendere minime le dosi al paziente a parità di beneficio diagnostico o terapeutico.

Nello specifico, il *principio di ottimizzazione* sancisce che:

- 1) Tutte le dosi dovute a esposizioni mediche per scopi radiologici, a eccezione delle procedure radioterapeutiche, devono essere mantenute al livello più basso ragionevolmente ottenibile e compatibile con il raggiungimento dell'informazione diagnostica richiesta, tenendo conto di fattori economici e sociali;
- 2) Per tutte le esposizioni mediche a scopo terapeutico, lo specialista deve programmare individualmente l'esposizione dei volumi bersaglio tenendo conto che le dosi a volumi e tessuti non bersaglio devono essere le più basse ragionevolmente ottenibili e compatibili con il fine radioterapeutico perseguito con l'esposizione preservando l'efficacia del trattamento;
- 3) Ai fini dell'ottimizzazione dell'esecuzione degli esami radiodiagnostici si deve tenere conto dei livelli diagnostici di riferimento (LDR) secondo le linee guida indicate nell'allegato II del D.Lgs 187/2000;
- 4) Particolare attenzione deve essere posta a che la dose derivante da esposizione medico-legale sia mantenuta al livello più basso ragionevolmente ottenibile;
- 5) Le procedure di ottimizzazione e i vincoli di dose per le esposizioni di soggetti che coscientemente e volontariamente collaborano, al di fuori della loro occupazione, all'assistenza e al conforto dei pazienti sottoposti a diagnosi o, se del caso, a terapia, sono quelli indicati nell'allegato I, parte II del D.Lgs 187/2000;
- 6) Nel caso di un paziente sottoposto a un trattamento o a una diagnosi con radionuclidi, se del caso, il medico nucleare o il radioterapista fornisce al paziente stesso o al suo tutore legale istruzioni scritte volte a ridurre, per quanto ragionevolmente conseguibile, le dosi per le persone in diretto contatto con il paziente, nonché le informazioni sui rischi delle radiazioni ionizzanti. Tali istruzioni sono impartite prima di lasciare la struttura sanitaria.
- 7) È fatto obbligo la realizzazione di un programma di garanzia della qualità in cui il controllo di qualità serve a ottimizzare l'efficacia e l'efficienza delle apparecchiature radiologiche impiegate.

4.3 I soggetti responsabili

Il D.Lgs 187/00 individua i responsabili della predisposizione e attuazione delle misure generali e specifiche di radioprotezione del paziente. Prevede, inoltre, che gli operatori direttamente coinvolti

nell'esposizione dei pazienti debbano possedere una formazione specifica e seguire, con periodicità quinquennale, corsi di formazione continua, affidati dalle autorità regionali, alle associazioni e alle società scientifiche accreditate.

Gli attori del processo di ottimizzazione sono essenzialmente tre: il responsabile dell'impianto radiologico, il medico specialista (radiologo, radioterapista o medico nucleare) e l'Esperto in Fisica Medica. Il responsabile dell'impianto radiologico, unitamente all' esercente, rappresenta il referente e il responsabile di tutte le azioni e le reazioni conseguenti: attivare il programma di garanzia della qualità, far ripristinare le apparecchiature radiologiche ed eventualmente dimetterle qualora non siano più in grado di mantenere lo stesso livello di efficienza ed efficacia.

Lo specialista esegue l'esposizione ed è quindi responsabile dell'ottimizzazione della singola esposizione e del risultato diagnostico o terapeutico conseguito.

Il fisico ha competenze specifiche nell'attuazione degli appropriati programmi di garanzia di qualità e controlli di qualità indispensabili ai fini della procedura di ottimizzazione.

4.3.1 L'esercente

La figura cui fa capo il sistema di gestione è l'esercente, definito come "soggetto che, secondo il tipo e l'organizzazione dell'impresa, ha la responsabilità dell'impresa stessa ovvero dell'unità produttiva, intesa come stabilimento o struttura finalizzata alla produzione di beni o servizi, dotata di autonomia finanziaria e tecnico-funzionale". Egli ha il compito di:

- rendere disponibili le risorse per assicurare l'espletamento del programma di garanzia della qualità radiologica e per l'attuazione delle procedure di radioprotezione;
- identificare il responsabile dell'impianto radiologico;
- garantire, di concerto con quest'ultimo, che, nella radioterapia, lo specialista si avvalga di un esperto in fisica medica e che, in medicina nucleare in vivo, sia disponibile un esperto in fisica medica;
- su segnalazione del responsabile dell'impianto, far eseguire gli interventi correttivi sulle apparecchiature che non corrispondono ai criteri di accettabilità ovvero limitarne l'uso o alienarle;
- tenere un inventario delle attrezzature radiologiche;
- provvedere affinché nei reparti siano esposti avvisi alle pazienti sulla pericolosità delle radiazioni.

4.3.2 Il responsabile dell'impianto radiologico

Dopo l'esercente, la figura principale è quella del responsabile dell'impianto radiologico. Egli è un medico specialista in radiodiagnostica, radioterapia o medicina nucleare, individuato dall'esercente. Quest'ultimo può rivestire la funzione di responsabile dell'impianto se è abilitato a svolgere l'indagine clinica. I suoi compiti sono molteplici; egli è il soggetto attorno al quale ruota il programma di garanzia della qualità ed esprime il giudizio di idoneità all'uso clinico delle attrezzature, sulla base dei controlli di qualità, della verifica delle procedure e delle dosi mediamente assorbite dai pazienti. Si avvale della collaborazione del medico specialista e dell'Esperto in Fisica Medica.

Il responsabile predispone il programma di garanzia della qualità, comprese le procedure di valutazione della dose e delle attività somministrate ai pazienti, e inoltre:

- adotta protocolli scritti per ciascuna apparecchiatura e pratica radiologica standardizzata;

- provvede, per quanto di competenza e di concerto con l' esercente, affinché lo specialista si avvalga dell' esperto in fisica medica nelle pratiche di radioterapia e che lo stesso sia disponibile nelle attività di medicina nucleare;
- verifica, ogni due anni, i livelli diagnostici di riferimento, per ogni apparecchiatura e tipologia di pratica radiologica segnalando all' esercente gli eventuali superamenti dei livelli prefissati, per l' adozione degli interventi correttivi, per eventuali limitazioni o accantonamento delle apparecchiature;
- adotta misure ragionevolmente attuabili per ridurre la probabilità di dosi accidentali (es. ripetizione delle radiografie per sovra/sottoesposizione) o non intenzionali, mediante istruzioni e protocolli scritti, sulla base degli incidenti che avvengono;
- provvede affinché i risultati delle prove siano registrati e conservati per almeno cinque anni;
- esprime il giudizio sulla qualità della prestazione e il giudizio di accettabilità, anche sulla base di periodiche valutazioni dosimetriche con il supporto dell' esperto in fisica medica, con particolare attenzione verso esposizioni che riguardano: bambini, programmi di screening, radiologia interventistica, tomografia computerizzata e radioterapia.

4.3.3 Il medico specialista

La figura del medico specialista è individuata, di volta in volta, in vari soggetti in funzione dell' attività svolta: specialista in radiodiagnostica, radioterapia, medicina nucleare ovvero medico chirurgo specialista nella disciplina in cui rientra l' esposizione medica (attività radiodiagnostiche complementari all' esercizio). Lo specialista è responsabile dell' esposizione medica del paziente, e inoltre:

- giustifica la necessità della singola indagine diagnostica o del trattamento e sceglie la metodologia idonea a ottenere il miglior beneficio clinico e il minor detrimento per il paziente (ottimizzazione) anche attraverso l' uso di tecniche sostitutive;
- effettua le esposizioni mediche su richiesta motivata del medico prescrivente, tenendo conto dei principi di giustificazione e ottimizzazione;
- effettua una accurata anamnesi allo scopo di sapere se la donna è in stato di gravidanza o se allatta al seno (in caso di somministrazione di radioisotopi);
- se la gravidanza non può essere esclusa, considera la dose prevista per la pratica radiologica e cura particolarmente l' ottimizzazione e, se la dose al feto è stimata essere maggiore di 1mSv, decide individualmente di procrastinare l' intervento ovvero di sospendere l' allattamento;
- nei casi previsti, giustifica la necessità che il paziente debba essere assistito da un volontario durante l' esecuzione dell' esame o nelle varie fasi del trattamento;
- può delegare gli aspetti pratici dell' esecuzione dell' attività radiologica al tecnico sanitario di radiologia medico (TSRM) e/o all' infermiere in funzione delle competenze;
- si avvale, per lo svolgimento dei suoi compiti, della consulenza dell' esperto in fisica medica per le procedure fisiche, dosimetriche e informatiche connesse alla radioprotezione del paziente e alla valutazione delle dosi ai pazienti.

4.3.4 L' Esperto in Fisica Medica

Oltre a valutare e verificare le dosi impartite nelle esposizioni mediche ed effettuare i controlli di qualità sulle apparecchiature radiologiche, i principali compiti dell' esperto in fisica medica sono:

- collaborare alla stesura del programma di garanzia della qualità e dei protocolli dei controlli di qualità;
- predisporre le procedure fisiche dosimetriche e informatiche per la protezione del paziente;
- valutare le dosi assorbite dai pazienti congiuntamente con il responsabile dell'impianto;
- offrire la propria consulenza sull'ottimizzazione delle procedure, la dosimetria dei pazienti e il programma di garanzia della qualità, compreso i controlli di qualità;
- verificare i livelli diagnostici di riferimento delle pratiche radiologiche, su richiesta del responsabile dell'impianto, seguendo le modalità indicate dalla Commissione Europea;
- collaborare con il medico specialista nei casi previsti.

4.4 Il programma di garanzia della qualità

La *garanzia della qualità radiologica* è definita nell'attuale legislazione come: *“le azioni programmate e sistematiche intese ad accertare con adeguata affidabilità che un impianto, un sistema, un componente o un procedimento funzionerà in maniera soddisfacente conformemente agli standard stabiliti”*.

Il programma di garanzia della qualità per essere efficace ed efficiente deve basarsi su controlli e misure sulle attrezzature (non solo quelle radiologiche), e soprattutto deve tener conto degli aspetti medici e organizzativi, per i quali il ruolo del medico specialista, del tecnico di radiologia e di altri operatori è fondamentale.

Il D.Lgs 187/2000 stabilisce che il Responsabile dell'impianto Radiologico, avvalendosi dell'Esperto in Fisica Medica, provveda a che siano intrapresi adeguati programmi di garanzia della qualità, compreso il controllo di qualità e che siano effettuate *prove di accettazione* prima dell'entrata in uso delle attrezzature radiologiche e quindi *prove di funzionamento* sia a intervalli regolari che dopo ogni intervento rilevante di manutenzione.

Le prove di accettazione e di funzionamento su ogni apparecchiatura, descritte in appositi protocolli, sono effettuate a cura dell'Esperto in Fisica Medica e, in base ai risultati delle prove, il responsabile dell'impianto esprime il giudizio di idoneità all'uso clinico.

Oltre alle prove di accettazione e di funzionamento, ai sensi delle norme tecniche, tutte le attrezzature dell'area radiologica devono essere sottoposte a controllo di qualità al fine di verificare la costanza nel tempo dei parametri funzionali.

4.5 I Livelli Diagnostici di Riferimento (LDR)

Per le pratiche radiodiagnostiche si fa uso di una ottimizzazione collettiva per mezzo dei Livelli Diagnostici di Riferimento (LDR). Questi sono dei valori standard, rilevati su base comunitaria (Direttiva Euratom 97/43) per effettuare il confronto, per ogni tipologia di esame, tra parametri dosimetrici di semplice misurabilità e i valori utilizzati correntemente nella singola struttura sanitaria. Tale valutazione, effettuata periodicamente, consente la programmazione delle azioni necessarie ai fini del conseguimento di livelli di qualità delle immagini ottimali con l'impiego delle minime dosi per ciascuna tipologia di esame.

I Livelli Diagnostici di Riferimento sono, quindi, da intendersi come un indice che permetta di valutare ed eventualmente ottimizzare il livello di radioprotezione del paziente.

Nell'Allegato II del D.Lgs 187/2000 (Tabella 4.1) sono riportati i valori di LDR per gli esami radiografici più comuni o caratterizzati da dosi elevate al paziente. Essi sono comunemente espressi in termini di *dose superficiale in ingresso (ESD) alla superficie del paziente o di un fantoccio di*

materiale tessuto equivalente di dimensioni standard, sia per adulti che per pazienti pediatrici e per esami con impiego di TC, in termini di *indici di dose CT (CTDI)* o *prodotto dose per lunghezza (DLP)*, mentre nessuna indicazione è fornita per le procedure radiologiche con impiego di fluoroscopia.

Le norme vigenti sanciscono, inoltre l'obbligo per il responsabile dell'impianto della verifica del rispetto degli LDR con scadenza non superiore a due anni. Tali verifiche, basate su valutazioni dosimetriche, devono essere espletate dall'Esperto in Fisica Medica.

Tabella 4.1 – Livelli Diagnostici di Riferimento per gli esami radiografici più comuni

RADIOLOGIA TRADIZIONALE			
<i>ESAMI:</i>	<i>* DOSE D'INGRESSO (mGy)</i>	<i>ESAMI:</i>	<i>* DOSE D'INGRESSO (mGy)</i>
Addome	10	Urografia (per ripresa)	10
Torace PA	0.4	Cranio AP/PA	5
Torace Lat	1.5	Cranio Lat	3
Rachide lombare AP	10	Rachide Lombo Sacrale	40
Rachide lombare Lat	30	Pelvi AP	10
Mammografia CC	10 mGy (dose di ingresso con griglia)		
RADIOLOGIA PEDIATRICA			
<i>ESAMI:</i>	<i>DOSE D'INGRESSO (μGy)</i>	<i>ESAMI:</i>	<i>DOSE D'INGRESSO (μGy)</i>
Cranio PA/AP	1500 (5 anni)	Torace PA/AP	100 (5 anni)
Cranio Lat	1000 (5 anni)	Torace Lat	200 (5 anni)
Pelvi AP	200 (neonati)	Torace AP	80 (neonati)
Pelvi AP	900 (5 anni)	Addome	1000 (5 anni) **
TOMOGRAFIA COMPUTERIZZATA			
<i>ESAMI</i>	<i>°CTDI_w (mGy)</i>	<i>°°DLP (mGy cm)</i>	
Testa	60	1050	
Torace	30	650	
Addome	35	800	
Pelvi	35	600	

*Riferita alla superficie del paziente - **Viene indicata l'età dei pazienti di riferimento per la determinazione della dose - °CTDI_w: Indice di dose tomografica pesato - °°DLP: Prodotto dose-lunghezza

4.5.1 Trattamenti radiologici dei pazienti pediatrici

Nella radiologia pediatrica, i criteri di dose, stabiliti per gli adulti, vengono riadattati, data l'elevata aspettativa di vita, a causa dell'aumento del rischio di manifestazioni tardive (effetti stocastici) dovute all'esposizione a radiazioni ionizzanti.

È comunque da sottolineare che nell'ambito della radiologia pediatrica le dosi al paziente risultano relativamente basse se la tecnica adottata è correttamente impostata. Le dosi indebite spesso derivano dalla ripetizione dell'esame essendo i pazienti pediatrici generalmente non collaborativi e dall'assenza di protocolli tecnici specializzati in rapporto all'età e al peso del paziente. A tale proposito l'ottimizzazione dei protocolli pediatrici è particolarmente raccomandata soprattutto nell'esame TC.

Per questi motivi, tra le indicazioni per l'ottimizzazione della dose ai pazienti pediatrici, particolare attenzione deve essere prestata:

- al posizionamento che può richiedere adeguati sistemi di immobilizzazione a seconda dell'età e della collaborazione del paziente;
- al corretto utilizzo delle griglie antidiffusione;

- alla corretta collimazione dei campi;
- all'impiego di dispositivi di protezione.

4.5.2 Trattamenti radiologici delle donne in gravidanza

Per quanto concerne la radioprotezione delle donne in gravidanza il D.Lgs 187/2000 con l'articolo 10 e l'Allegato VI fornisce le raccomandazioni e le disposizioni atte a garantire la radioprotezione da esposizioni mediche durante la gravidanza e l'allattamento. In particolare prima dell'esposizione si raccomanda di "effettuare un'accurata anamnesi allo scopo di sapere se la donna è in stato di gravidanza" e di procrastinare l'indagine diagnostica o l'intervento successivamente alla gravidanza nei casi in cui la valutazione della dose al feto o all'embrione risulti superiore a 1 mSv. Esami radiografici delle estremità, del cranio, del torace e TC del cranio, eseguiti correttamente (adeguata collimazione e, se opportuno, protezione dell'utero mediante grembiule di piombo) comportano un'esposizione a valori di dosi generalmente pari a una piccola frazione del fondo naturale a cui l'embrione o il feto sarebbero esposti durante l'intera gestazione. Tuttavia, anche in questi casi, lo stato di gestazione della paziente va accertato al fine di adottare eventuali ulteriori precauzioni nella scelta della tecnica radiografica (es. particolare attenzione al posizionamento) in modo da escludere possibili accidentali inserimenti della pelvi o dell'addome nel fascio primario di radiazioni. Le succitate disposizioni riportate nella normativa si applicano a donne di età compresa tra la pubertà (circa 12 anni) e la menopausa (circa 50 anni) e a parte i casi in cui è possibile escludere con sicurezza la possibilità di una gravidanza, si dovrà chiedere per esplicito, anche per iscritto, alla paziente se può essere incinta e la data di inizio dell'ultima mestruazione.

Qualora metodiche alternative risultassero inadeguate e fosse impossibile procrastinare l'indagine radiologica, possono essere adottate tecniche che implicano esposizioni all'utero a dosi inferiori se il livello atteso dell'informazione diagnostica può essere ritenuto soddisfacente. In tali casi dovrà essere eseguita dall'Esperto in Fisica Medica una valutazione, possibilmente in via preliminare, della dose assorbita dall'embrione o dal feto.

4.5.3 Livelli Diagnostici di Riferimento in Medicina Nucleare

Anche per quanto interessa la Medicina Nucleare, nell'ambito dell'attuale normativa, vengono definiti i cosiddetti *livelli diagnostici di riferimento*: si tratta di livelli di attività da adottare nelle pratiche radiodiagnostiche mediche per esami tipici per gruppi di pazienti adulti di corporatura standard. La direttiva raccomanda fortemente che tali livelli *non debbano essere superati* per procedimenti standard, in condizioni di applicazioni corrette e normali e nell'ambito dello specifico intervento diagnostico.

Queste definizioni chiamano in gioco processi di ottimizzazione degli esami, per cui tutte le dosi dovute a esposizioni mediche a scopi diagnostici dovranno essere ragionevolmente mantenute al livello più basso possibile, rispettando naturalmente il concetto che sia raggiunta la informazione diagnostica migliore, tenendo conto delle risorse disponibili e dei fattori economici e sociali.

I valori dei Livelli Diagnostici di Riferimento per la medicina nucleare riportati nell'Allegato II del D.Lgs 187/2000 corrispondono alle attività massime somministrabili di radiofarmaco. Le attività si riferiscono all'uomo adulto standard, in condizioni normali, senza tener conto di situazioni patologiche. I suddetti LDR si riferiscono a persona adulta, con massa corporea non inferiore ai 60 kg, presumibilmente esenti da alterazioni rilevanti del metabolismo e/o eliminazione dei

radiofarmaci. In caso di massa corporea minore di 60 Kg e in particolare nei bambini si raccomanda di ridurre l'attività somministrata secondo lo schema riportato nelle linee guida correnti.

4.5.4 Attività somministrate in pediatria e protezione del bambino

La somministrazione di radiofarmaci in età pediatrica richiede una speciale considerazione. Seguendo il principio che l'attività somministrata deve essere la minima per ottenere dei risultati qualitativamente soddisfacenti, la piccola massa corporea dei bambini permette di ridurre la attività rispetto a quella somministrata agli adulti.

La somministrazione di radiofarmaci nei bambini richiede sempre un particolare impegno da parte del medico nucleare sia per la valutazione preventiva dell'effettiva necessità di eseguire l'indagine alla luce del rapporto rischio/beneficio, sia per la messa in atto di accorgimenti per minimizzare la dose senza detrimento dell'informazione diagnostica qualora si proceda all'esecuzione dell'indagine.

I principali accorgimenti impiegati per minimizzare la dose ai pazienti pediatrici, così come per gli adulti, sono di seguito riportati:

- a. controllo di qualità attrezzature diagnostiche;
- b. verifica dell'adeguatezza delle immagini acquisite e dell'eshaustività dell'acquisizione prima della dimissione, per poter eventualmente ripetere o completare l'indagine senza necessità di reiniettare il radiofarmaco;
- c. immobilizzazione del paziente;
- d. adozione di procedure atte a favorire una rapida eliminazione del radiofarmaco non localizzato nell'organo in esame.

L'immobilizzazione del paziente è particolarmente problematica quando si tratta di bambini piccoli. Spesso può essere necessaria una sedazione farmacologica. In ogni caso la puntura della vena deve precedere l'inizio dell'indagine di un tempo sufficiente perché il bambino si tranquillizzi dopo la reazione al "piccolo trauma". Nel caso di indagini che prevedano l'inizio immediatamente dopo la somministrazione del radiofarmaco, occorre prevedere precedentemente all'inserzione di una fleboclisi. Questo provvedimento d'altra parte si impone anche per assicurare un'adeguata diuresi quando si somministrano traccianti a rapida eliminazione urinaria. Alcuni operatori durante gli studi dinamici utilizzano un apposito dispositivo immobilizzante consistente in un materasso plastico riempito di palline di polistirene, connesso a una pompa a vuoto. L'estrazione dell'aria fornisce un fermo supporto che modella il contorno del paziente. Infine è consigliabile consentire a uno dei genitori di restare con il bambino durante la durata dell'indagine per dargli un senso di maggiore sicurezza e ridurre l'ansietà.

I metodi utilizzabili per ridurre la dose agli organi critici in vari tipi di indagini medico-nucleari sono quelli comunemente usati anche negli adulti, e vanno dalla idratazione e frequente svuotamento della vescica, alla somministrazioni di sostanze bloccanti la tiroide, a somministrazione di lassativi a secondo del tipo di tracciante impiegato.

4.5.5 Cautele per le donne in età fertile o in gravidanza in Medicina Nucleare

Nelle donne in età fertile la necessità di adottare particolari cautele deriva dalla possibilità che al momento della somministrazione di un radiofarmaco sia in atto una gravidanza, anche se non nota alla paziente. Ne potrebbe conseguire un'indebita esposizione del feto alle radiazioni ionizzanti con un conseguente aumento del rischio di patologie per il nascituro.

Il problema assume un particolare rilievo per dosi terapeutiche, ma deve essere tenuto in considerazione anche per dosi diagnostiche.

Sulla base di raccomandazione internazionali si può consigliare l'adozione delle seguenti misure per prevenire o minimizzare l'esposizione di un embrione o di un feto:

- a) anamnesi accurata intesa a valutare la possibilità di gravidanza, da condurre con una discrezione e attenzione particolari nelle adolescenti;
- b) prudenzialmente la gravidanza può essere considerata in atto in caso di ritardo mestruale, salvo che vi siano elementi per escluderla con certezza;
- c) in caso di ritardo in una donna con ciclo mestruale irregolare, può essere indicato un test preliminare di gravidanza.

Poiché nelle indagini diagnostiche comuni non si realizzano concentrazioni radionuclidi tissutali tali da esporre un embrione futuribile a una dose significativa, non è necessario prescrivere un intervallo di attesa tra l'indagine e una successiva gravidanza. Questa precauzione dovrà invece essere messa in atto nel caso che la donna sia stata sottoposta a radioterapia metabolica. Come regola generale, è consigliabile che un eventuale concepimento sia evitato fintanto che si calcoli che la dose assorbita dal feto per effetto dell'attività residua materna sia al di sopra di 1 mSv. In pratica ciò viene a significare che dopo una terapia con radioiodio per ipertiroidismo è opportuno rinviare un'eventuale gravidanza di almeno 4 mesi.

In caso di gravidanza in atto, l'indagine può essere eseguita solo in caso di urgenza, o quando dichiarata necessaria. E' opportuno che si stabilisca se il rischio di non ottenere, senza l'indagine, la diagnosi necessaria è maggiore di quello derivante da una irradiazione fetale.

Ciò presuppone comunque una stima approssimativa della dose al feto basata sulle caratteristiche fisiche e biologiche del radiofarmaco. Occorre innanzi tutto distinguere i radiofarmaci che attraversano liberamente la barriera placentare (es. ioduro e pertecnetato radioattivi) da quelli che non l'attraversano (es. radiocolloidi; eritrociti marcati).

Mentre nel primo caso si ha un significativo assorbimento di dose dovuto sia al metabolismo fetale (es. captazione di radioiodio da parte della tiroide) sia ai meccanismi di irraggiamento esterno, proveniente da organi materni adiacenti (es. vescica), principalmente dovuta al radiofarmaco captato dall'organo bersaglio fetale (nel caso dello iodio, la tiroide), nel secondo caso la dose fetale deriva da una sorgente esterna (nel caso di radiocolloidi fegato e milza della madre o più comunemente in genere dalla vescica) senza che vi sia un particolare organo bersaglio fetale e la dose al feto potrà, con buona approssimazione, essere assunta pari a quella assorbita dall'utero.

Nel caso frequente di radiofarmaci a rapida eliminazione urinaria, la vescica materna diventa una sorgente di radiazioni per il feto, oltre che per i tessuti e organi contigui materni. Per ridurre le dosi assorbite è consigliabile iniettare il radiofarmaco a vescica parzialmente piena e far eseguire frequenti minzioni dopo l'esame, assicurando una diuresi abbondante mediante preventiva somministrazione di liquidi e di diuretici. Se lo stato di gravidanza viene scoperto successivamente all'indagine con radiazioni ionizzanti, è necessario in via preliminare procurarsi tutti i dati necessari per una stima più accurata possibile della dose assorbita dal feto, effettuata dall'Esperto in Fisica Medica, come già previsto nei casi di diagnostica RX, almeno in tutti quei casi in cui sia presunto il superamento del vincolo di dose al feto, pari a 1 mSv.

L'anamnesi preliminare delle donne in età fertile deve sempre considerare l'eventualità di una condizione di allattamento in atto. Nelle donne che allattano, qualora non fosse opportuno sospendere l'indagine, è necessario interrompere l'allattamento al seno materno per un tempo sufficiente perché

la concentrazione del radiofarmaco nel latte si riduca a valori trascurabili. Questo tempo dipende dal tipo di radiofarmaco somministrato e, in alcuni casi, può anche essere definitiva (es. somministrazione di ^{131}I).

4.6 La protezione dei familiari dopo prestazioni medico-nucleari

Nel caso di somministrazione di radionuclidi a scopo diagnostico il rischio da radiazioni per i familiari del paziente si può considerare trascurabile dato che l'emivita effettiva della quasi totalità dei radiofarmaci utilizzati è breve e che il loro impiego è sporadico.

Nel caso invece di somministrazione a scopo terapeutico il paziente può diventare una sorgente significativa di radiazioni e di possibile contaminazione dell'ambiente.

Una persona che vive a contatto con il paziente per alcuni giorni può totalizzare una dose assorbita che supera quella massima ammissibile per la popolazione.

Il problema riguarda essenzialmente il trattamento terapeutico con I-131 .

Poiché i pazienti dopo somministrazione di iodio radioattivo diventano una sorgente di potenziale contaminazione ed esposizione per altre persone, è necessario fornire istruzioni riguardanti il loro comportamento per mantenere le dosi ai loro familiari e ad altre persone vicine, entro limiti accettabili, che possono essere considerati vincoli di dose.

Il medico specialista responsabile del trattamento deve assicurarsi che il paziente o la persona che se ne prende carico siano informate oralmente e per iscritto delle norme di comportamento che dovranno essere adottate dal paziente e dalla sua famiglia o comunque dalle persone vicine prima che il paziente sia dimesso. Ovviamente il medico si deve rendere conto che le istruzioni siano ben comprese e che si può essere certi che siano seguite dalle persone interessate. Si dovrà ovviamente anche tener conto delle condizioni socio-economiche del paziente e in particolare occorre stabilire se la sua abitazione abbia un numero di stanze sufficienti e servizi igienici adeguati.

La durata del periodo di adempimento delle istruzioni deve essere stabilita in base all'effettivo rateo di dose a 1 metro dal paziente in posizione eretta.

5. LA SICUREZZA IN UN IMPIANTO DI RISONANZA MAGNETICA

Per la formazione e l'informazione del personale operante presso il sito di Risonanza Magnetica, vengono di seguito riportati i rischi correlati con un impianto di tomografia a Risonanza Magnetica.

I rischi potenziali associati all'utilizzo di apparecchiature a risonanza magnetica possono essere classificati in tre categorie:

- 1) effetti di campi magnetici statici;
- 2) effetti di campi magnetici variabili nel tempo;
- 3) effetti associati all'assorbimento di energia elettromagnetica;
- 4) rischi associati alla presenza e all'utilizzo di liquidi criogeni.

5.1 Campi magnetici statici

5.1.1 Effetti

Un impianto RMN crea un campo magnetico statico uniforme nella zona centrale del tunnel e un campo superiore a 5 mT (nel caso di un tomografo da 1.5 T) in tutta la sala magnetica. Per campi magnetici maggiori di 20 mT comincia a farsi sentire l'interazione meccanica dovuta al campo disperso sugli oggetti ferromagnetici.

La forza di attrazione del campo magnetico di un sistema RM può far acquistare a oggetti ferromagnetici velocità tali da costituire un pericolo non solo per i pazienti, ma anche per gli operatori sanitari presenti nella sala.

L'esposizione al campo statico può presentare inoltre rischi di altro tipo dovuti all'interazione con vari tipi di oggetti che possono essere presenti all'interno del corpo del paziente. Nel corpo del paziente possono essere presenti oggetti metallici ferromagnetici, come protesi metalliche, perni dentali, graffe per aneurismi di cui il paziente è generalmente a conoscenza, ma anche altri oggetti, per esempio schegge metalliche, della cui presenza il paziente può non essere consapevole. Questi oggetti sono sottoposti a una forza di rotazione se immersi in un campo statico, e di traslazione se il campo non è omogeneo, costituendo un rischio estremamente serio.

E' necessario accertarsi della presenza di tali oggetti all'interno del corpo del paziente, mediante la compilazione di opportuni questionari, o anche per mezzo di radiografie quando la presenza di tali oggetti è solo sospettata.

5.1.2 Prescrizioni di sicurezza

E' VIETATO introdurre oggetti ferromagnetici di qualunque tipo all'interno della sala magnetica.

Coloro (medici, pazienti, infermieri, portanti, accompagnatori e/o visitatori autorizzati, ecc.), per i quali è previsto l'ingresso in sala magnetica o nelle sale antistanti, devono sottoporsi al metal-detector mobile e depositare nell'apposito armadio tutti gli oggetti ferromagnetici mobili.

L'accesso al sito RM deve essere rigorosamente precluso a:

- Portatori di pacemaker;
- Portatori di protesi dotate di circuiti attivi;
- Portatori di preparati metallici intracranici o comunque posizionati in prossimità di strutture anatomiche vitali;
- Portatori di clips vascolari o schegge in materiale ferromagnetico;
- Portatori di schegge ferromagnetiche;

- Portatori di qualsiasi corpo metallico posizionato in vicinanza di parti anatomiche vitali.

5.2 Campi magnetici variabili nel tempo

5.2.1 Effetti

Il principale meccanismo di interazione con il corpo umano dei campi magnetici variabili nel tempo, siano essi i gradienti di campo statico o il campo a radiofrequenza, è l'induzione, all'interno dei tessuti, di correnti elettriche che possono causare il riscaldamento dei tessuti e la stimolazione dei tessuti muscolari e nervosi elettricamente eccitabili.

Per quanto riguarda i gradienti, l'effetto di tipo termico è trascurabile rispetto a quello di stimolazione che può avvenire quando nel corpo sono indotte densità di corrente superiori a 100 mA/m^2 , causando possibili rischi sanitari connessi alla stimolazione dei tessuti muscolari e dei nervi periferici.

I principali effetti fisiopatologici possono quindi essere:

- a) Alterazioni nei potenziali di azione di cellule eccitabili;
- b) Stimolazioni neuromuscolari;
- c) Fibrillazione cardiaca.

Non essendo possibile misurare direttamente la densità di corrente all'interno del corpo del paziente, viene utilizzata una grandezza fisica direttamente proporzionale alla densità di corrente, la derivata temporale dell'induzione magnetica (dB/dt).

Su tale grandezza verranno imposte delle limitazioni al fine di ridurre il rischio sanitario.

5.2.2 Prescrizioni di sicurezza

Secondo la vigente normativa si ritiene che valori di dB/dt inferiori a 6 T/s non rappresentino rischio per la salute del paziente.

E' tuttavia possibile estendere l'esposizione di pazienti e volontari a campi magnetici variabili nel tempo superiori alla soglia di 6 T/s previa valutazione da parte del medico responsabile dell'analisi, del beneficio derivante al paziente dall'analisi stessa a fronte dei possibili rischi.

Per periodi di variazione della densità di flusso magnetico pari o superiori a $120 \text{ } \mu\text{s}$, l'esposizione deve essere limitata a valori di picco inferiori a 20 T/s .

Nella valutazione dei rischi associati a tali estensioni dei limiti di esposizione, è necessario tenere presente che pazienti affetti da alcune patologie cardiocircolatorie o neurologiche, nonché pazienti sottoposti a terapie a base di attivatori neuronali, possono essere particolarmente sensibili all'esposizione a campi magnetici variabili nel tempo. E' pertanto necessario che in tutti i casi in cui il medico consideri l'opportunità di estendere le condizioni di esposizione a valori di $\text{dB/dt} > 6 \text{ T/s}$, predisponga un preventivo controllo della funzionalità cardiaca del paziente (ECG). Si raccomanda inoltre che il medico effettui controlli sia sulla stimolazione periferica che sulla funzionalità cardiocircolatoria del paziente, durante analisi che prevedono l'impiego di dB/dt superiori a 6 T/s .

5.3 Campi a radiofrequenza

5.3.1 Effetti

Le correnti elettriche indotte dai campi magnetici a radiofrequenza non possono stimolare i tessuti elettricamente eccitabili, mentre sono in grado di riscaldare i tessuti divenendo perciò causa potenziale di diversi effetti fisiologici che consistono in alterazioni delle funzioni cardiovascolari, riproduttive, visive, uditive, endocrine e nervose. La grandezza fisica più appropriata per

quantificare l'energia elettromagnetica convertita in calore nei tessuti è la potenza assorbita nell'unità di massa di tessuto (SAR).

5.3.2 Prescrizioni di sicurezza

Al fine di evitare innalzamenti della temperatura corporea superiori a 0.5 °C, che si considerano ben tollerati anche in bambini, donne in gravidanza e in soggetti con difetti nel sistema cardiocircolatorio, il SAR non deve superare 1 W/Kg per esposizioni superiori a 30 min, mentre sono permessi valori più alti per esposizioni più brevi.

In condizioni ambientali adeguate (temperatura ambiente < 22 °C, umidità relativa < 50%) il rispetto di tale soglia viene assicurato limitando il valore medio del rateo di assorbimento specifico (SAR) a corpo intero, mediato su qualunque intervallo di tempo di 15 min, come segue (DM 3 – 8 – 1992):

per esposizioni di durata $t \geq 30$ min, SAR < 1 W/ Kg;

per $15 \text{ min} \leq t < 30$ min, SAR < $[30/t(\text{min})]$ W/Kg;

per $t < 15$ min, SAR < 2 W/Kg.

E' tuttavia possibile estendere l'esposizione di pazienti e volontari sino ad un innalzamento massimo della temperatura corporea di 1 °C, e a soglie di SAR medio a corpo intero (mediato su qualunque intervallo di tempo di 15 min e in condizioni ambientali adeguate, previa valutazione da parte del medico responsabile dell'analisi, del beneficio derivante al paziente dall'analisi stessa, a fronte dei possibili rischi) :

per esposizioni di durata $t \geq 30$ min, SAR < 2 W/Kg;

per $15 \text{ min} \leq t < 30$ min, SAR < $[60/t(\text{min})]$ W/Kg;

per $t < 15$ min, SAR < 4 W/Kg.

Nella valutazione dei rischi associati a tali estensioni nei limiti di esposizione, è necessario tenere presente che pazienti affetti da alcune patologie, (quali alterazioni nella funzionalità cardiovascolare, termoregolazione compromessa o ridotta, stati febbrili, ipertensione, ecc.), pazienti trattati con alcuni farmaci (quali diuretici, tranquillanti, sedativi, vasodilatatori, ecc.), bambini, anziani, pazienti in gravidanza o soggetti obesi, sono più suscettibili di soggetti normali ai possibili danni prodotti dal riscaldamento tessutale indotto da campi elettromagnetici.

Poiché le categorie di pazienti sensibili non sono ben definite, si raccomanda che in tutti i casi in cui il medico decida di estendere le condizioni di esposizione secondo quanto sopra precisato, vengano comunque effettuati sui pazienti normali controlli dei principali parametri fisiologici (battito cardiaco, temperatura corporea, pressione sanguigna, ecc.).

Inoltre bisogna considerare che:

- a) disomogeneità tessutali possono dar luogo a picchi localizzati di potenza assorbita e quindi provocare innalzamenti locali di temperatura;
- b) in prossimità della bobina a radiofrequenza possono verificarsi effetti di surriscaldamento locale;
- c) l'esposizione a campi elettromagnetici a radiofrequenza durante analisi a risonanza magnetica è prevalentemente confinata alla parte del corpo esaminata.

In nessun caso il valore medio del SAR localizzato in distretti corporei deve essere tale da indurre un innalzamento della temperatura locale al di sopra dei 38 °C in qualunque tessuto della testa; di 39 °C in qualunque tessuto del tronco; di 40 °C in qualunque tessuto degli arti.

In condizioni ambientali adeguate il rispetto di tali soglie viene assicurato limitando il valore medio del SAR a corpo intero (mediato su un qualunque intervallo di 6 min) come segue:

TESTA

per esposizioni di durata $t \geq 30$ min, SAR < 2 W/Kg;
per $15 \text{ min} \leq t < 30$ min, SAR < $[60/t(\text{min})]$ W/Kg;
per $t < 15$ min, SAR < 4 W/Kg.

TRONCO

per esposizioni di durata $t \geq 30$ min, SAR < 4 W/Kg;
per $15 \text{ min} \leq t < 30$ min, SAR < $[120/t(\text{min})]$ W/Kg;
per $t < 15$ min, SAR < 8 W/Kg.

ARTI

per esposizioni di durata $t \geq 30$ min, SAR < 8W/Kg;
per $15 \text{ min} \leq t < 30$ min, SAR < $[180/t(\text{min})]$ W/Kg;
per $t < 15$ min, SAR < 12 W/Kg.

Per proteggere tessuti scarsamente vascolarizzati, come ad esempio l'occhio, si raccomanda che tali tessuti non siano esposti a valori di SAR superiori a 0.1 W / 10g per periodi di durata superiore a 10 minuti.

Si fa presente che l'impianto installato ha un sistema di controllo e sicurezza per cui non può essere erogato un rateo di assorbimento specifico medio a corpo intero superiore a 0.4 W/Kg. Si raccomanda quindi di immettere il peso del paziente esatto per prevenire un'eccessiva esposizione alle radiofrequenze.

5.4 Rischi dovuti alla presenza e all'utilizzo di criogeni

Nei sistemi di risonanza a superconduttore, la necessità di creare un intenso campo magnetico viene soddisfatta con l'impiego di avvolgimenti elettrici idonei a funzionare in regime di superconduzione, i quali hanno bisogno di essere raffreddati a bassissime temperature. A tal fine viene utilizzato un gas criogeno, l'Elio liquido, a una temperatura di circa -269 °C.

Il contatto con gas o liquidi criogeni può provocare serie forme di congelamento, prestare quindi molta attenzione in presenza di tali sostanze.

L'utilizzo e la presenza di criogeni nel sistema impone l'adozione di alcune precauzioni di sicurezza di seguito riportate:

- Nel raffreddare i conduttori del magnete, i criogeni evaporano e devono quindi essere rabboccati periodicamente da personale qualificato. La velocità di evaporazione e la quantità di criogeno presente può essere monitorata sui manometri presenti presso il locale tecnico.
- Quando un tecnico qualificato del servizio assistenza riempie il magnete con i criogeni tutto il personale deve rimanere fuori dalla sala magnete. Se la presenza è necessaria, indossare guanti appropriati, una maschera per il viso, e in certi casi, anche protezioni per le orecchie.
- E' importante che il sistema di ventilazione sia mantenuto in buono stato, informare l'Esperto responsabile ed il personale tecnico di assistenza nel caso in cui si notino dei malfunzionamenti. Se si dovesse venire a contatto con un criogeno liquido sciacquare immediatamente la parte con abbondante acqua tiepida, coprire la parte con una benda sterile o con un lenzuolo pulito se l'area affetta è ampia, avvertire immediatamente un medico.