



ENTE PER LE NUOVE TECNOLOGIE
L'ENERGIA E L'AMBIENTE

Dipartimento Ambiente

IL SERVIZIO DI DOSIMETRIA PERSONALE DELL'ISTITUTO PER LA RADIOPROTEZIONE DELL'ENEA

E. FANTUZZI, T. BONARELLI

ENEA - Dipartimento Ambiente
Centro Ricerche "Ezio Clementel", Bologna

RT/AMB/99/13

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA
rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Ente.

DISCLAIMER

Portions of this document may be illegible in electronic image products. Images are produced from the best available original document.

PERSONAL MONITORING SERVICES AVAILABLE AT INSTITUTE FOR RADIATION PROTECTION OF ENEA

Abstract

Personal Monitoring provides the means to measure and record the radiation doses received by individual workers. The Ionising Radiation Decree (DL 230/95) set out the circumstances when the assessment and recording of person's exposure is legally required. Many employers issue dosimeters to staff even though there is no legal requirement to do so. This may be part of a Quality Assurance Programme or as a reassurance measure. Dosimeter readings will serve to ensure compliance with legal dose limits and assure the employer that radiation exposure is as low as reasonably achievable.

The ENEA - IRP Individual Monitoring Service (IMS) has been running for over 30 years. It offers personal dosimeters which are based on its expertise and backed up by continual research and development.

The first chapter of this report provides details of the dosimeters in use at Individual Monitoring Service ENEA -IRP enabling you to decide which ones most suit your needs. A short mention of future development will also be given.

The second and third chapters will deal with information about IMS's organisation, customer communications, dose reports form and administrative items.

Keywords: Personal Dosimeter, Dose Report, Individual Monitoring Services Managing

IL SERVIZIO DI DOSIMETRIA PERSONALE DELL'ISTITUTO PER LA RADIOPROTEZIONE DELL'ENEA

Riassunto

La dosimetria individuale fornisce gli strumenti per misurare e registrare le dosi da radiazioni ionizzanti ricevute dai lavoratori esposti. Il Decreto Legislativo 230/95 stabilisce le circostanze in cui il monitoraggio individuale è legalmente richiesto. Molti datori di lavoro forniscono dosimetri individuali anche quando non vi è una richiesta legale spesso per seguire le regole di un programma di assicurazione di qualità relativo alla radioprotezione o per ottenere una conferma che il principio ALARA sia soddisfatto.

Il Servizio di Dosimetria Personale dell'Istituto per la Radioprotezione dell'ENEA è attivo da oltre 30 anni. Esso offre dosimetri sviluppati sulla propria esperienza nelle tecniche dosimetriche che vengono continuamente aggiornati e adeguati pur rispecchiando lo stato dell'arte.

Nel primo capitolo si vuole descrivere in modo sintetico e schematico quali sono i dosimetri attualmente in uso in routine, quali sono le loro caratteristiche dosimetriche in modo da offrire la possibilità di scegliere il dosimetro più adeguato per le diverse esigenze. Un breve accenno è fatto anche sugli sviluppi futuri programmati. Nel secondo e terzo capitolo, invece, si vuole fornire anche un quadro della organizzazione attuale del Servizio Dosimetrico, delle modalità di comunicazione con l'Utente, del formato dei tabulati di dose e infine delle condizioni economiche ed amministrative.

Keywords: Dosimetro personale, Tabulati di dose, Gestione Servizi di Dosimetria Personale



INDICE

Introduzione	pag. 7
Capitolo 1. Dosimetri del Servizio Dosimetrico dell'Enea	7
1.1 Dosimetro personale per radiazione $x+\gamma$	11
1.1.1 Principali caratteristiche dosimetriche	11
1.1.2 Altre informazioni	14
1.1.3 Sviluppi futuri	14
1.2 Dosimetro personale per neutroni termici e γ	15
1.2.1 Principali caratteristiche dosimetriche	15
1.2.2 Altre informazioni	17
1.2.3 Sviluppi futuri	17
1.3 Dosimetro personale per neutroni veloci	18
1.3.1 Principali caratteristiche dosimetriche	18
1.3.2 Altre informazioni	20
1.3.3 Sviluppi futuri	20
1.4 Dosimetro per estremità per radiazione X, γ e β	21
1.4.1 Principali caratteristiche dosimetriche	21
1.4.2 Altre informazioni	22
1.4.3 Sviluppi futuri	23
1.5 Dosimetro di criticità	23
Capitolo 2. Modalità di gestione e fornitura dei dosimetri e dei dati dosimetrici.....	24
2.1 L'archivio dei dati	24
2.2 Modalità di gestione e fornitura dei dosimetri	25
2.2 Modalità di comunicazione dei dati dosimetrici	29
Capitolo 3. Note organizzative e amministrative	31
3.1 Note organizzative	31
3.2 Modalità di commisione e costi	33
Bibliografia	34
Allegati	37



INTRODUZIONE

Il Servizio di dosimetria personale dell'ENEA di Bologna fornisce ormai da oltre 30 anni dosimetri ambientali e individuali per radiazione fotonica, per neutroni termici ed associato campo gamma e per neutroni veloci.

Fin dall'inizio l'attività del Servizio e la qualità dei dosimetri forniti sono stati oggetto di studio e di ricerca al fine di renderli sempre idonei ed affidabili nel rispetto delle raccomandazioni internazionali e dei relativi aggiornamenti.

Ogni dosimetro prima di essere inserito nella routine del Servizio è stato progettato, studiato e qualificato presso i laboratori dell'ENEA.

Il tipo di dosimetri in uso al Servizio sono stati specchio anche dello stato dell'arte nella dosimetria esterna nel corso degli anni. Infatti all'inizio dell'attività, i dosimetri personali erano costituiti da pellicole fotografiche per radiazione fotonica e per neutroni termici ed emulsioni nucleari per radiazione neutronica veloce.

Successivamente nel 1985, con l'avvento della tecnica a termoluminescenza, i dosimetri a film sono stati sostituiti da dosimetri a termoluminescenza prima con rivelatori di ossido di berillio (BeO) in seguito, nel 1995, sostituiti con rivelatori di LiF(Mg,Cu,P).

I dosimetri per neutroni per la componente termica e per la componente veloce sono costituiti rispettivamente da dosimetri a termoluminescenza con rivelatori di LiF(Mg,Ti) e da rivelatori a tracce (CR-39).

Nel presente lavoro si vuole descrivere in modo sintetico e schematico quali sono i dosimetri attualmente forniti, quali sono le loro caratteristiche dosimetriche e infine illustrare la fasi principali della organizzazione attuale del Servizio Dosimetrico accennando anche agli sviluppi futuri.

CAPITOLO 1. DOSIMETRI PERSONALI DEL SERVIZIO DOSIMETRICO DELL'ENEA

Attualmente sono disponibili 6 tipi di dosimetri per diversi campi di radiazioni. In particolare tre dosimetri a termoluminescenza, per radiazione fotonica e neutroni termici, un rivelatore a tracce CR39 per neutroni veloci e, infine, due dosimetri di criticità con rivelatori ad attivazione, ambientale e personale. Questi ultimi sono solo brevemente descritti nel paragrafo 1.5, nel quale si fa riferimento ad un manuale che rappresenta una guida completa per le misure dosimetriche, ambientali e personali attraverso i dosimetri forniti dall'ENEA, da effettuarsi in caso di incidente di criticità.

Attualmente tutti i dosimetri sono calibrati attraverso irraggiamenti in aria e la grandezza dosimetrica di riferimento è il kerma in aria per i fotoni e il MADE (Equivalente di Dose Massimo), come definito nell'ICRP21 (1), per i neutroni. In futuro, con l'introduzione della grandezza dosimetrica individuale $H_p(d)$ (2,3,4), i dosimetri da utilizzare per il monitoraggio individuale saranno invece calibrati su fantoccio come previsto nella stessa definizione della grandezza di riferimento (5). I dosimetri per il monitoraggio ambientale verranno sempre irraggiati in aria libera, ma la grandezza di riferimento diventerà H^* (2,4).

Tutti i dosimetri sono stati messi a punto per il monitoraggio individuale, tuttavia possono essere tutti utilizzati anche per il monitoraggio ambientale. E' da evidenziare però, che i dosimetri per neutroni sono "asimmetrici", cioè sono tali per cui la corretta valutazione

dosimetrica presuppone che siano esposti alla radiazione incidente dalla parte contrassegnata dalla codifica.

I dosimetri a corpo intero sono tutti delle stesse dimensioni ($3.1 \times 4.1 \times 0.5 \text{ cm}^3$) ed inseriti in una busta di plastica protettiva. I dosimetri a termoluminescenza sono costituiti da una card su cui sono fissati i due rivelatori inserita a "sandwich" fra due supporti della stessa dimensione che contengono i filtri metallici in corrispondenza della posizione dei rivelatori (fig.1 e 2). Per evitare errori nell'assemblaggio dei tre elementi costituenti il dosimetro e per permetterne un facile controllo visivo, sia la card che i supporti per i filtri presentano un angolo smussato in alto a destra.

Il colore dei supporti per i filtri e delle card possono essere grigio chiaro o scuro e sono utilizzati alternativamente nei periodi di monitoraggio.

Il dosimetro per neutroni veloci (fig.3) è costituito da un rivelatore a tracce, dotato di codice a barre, inserito in un supporto analogo a quello per filtri degli altri due tipi di dosimetro.

Il dosimetro per estremità (fig.4) può essere fornito a scelta con un supporto ad anello o a bracciale contenente il medesimo tipo di rivelatore fissato sulla fascetta di capton e contrassegnato a fianco dal codice a barre.

Tutti i dosimetri di ogni tipo sono contrassegnati con un codice a barre che viene abbinato univocamente all'utilizzatore in modo automatico al momento del confezionamento. Il nominativo dell'utilizzatore compare sulla busta di plastica protettiva del dosimetro insieme ad una codifica, di cui si riporta di seguito la legenda (fig.5), che permette di identificare univocamente i dosimetri di ciascun Utente. La codifica contiene infatti caratteri identificativi dell'ente, del reparto, della persona, del dosimetro, del periodo di utilizzo e del tipo di dosimetro.

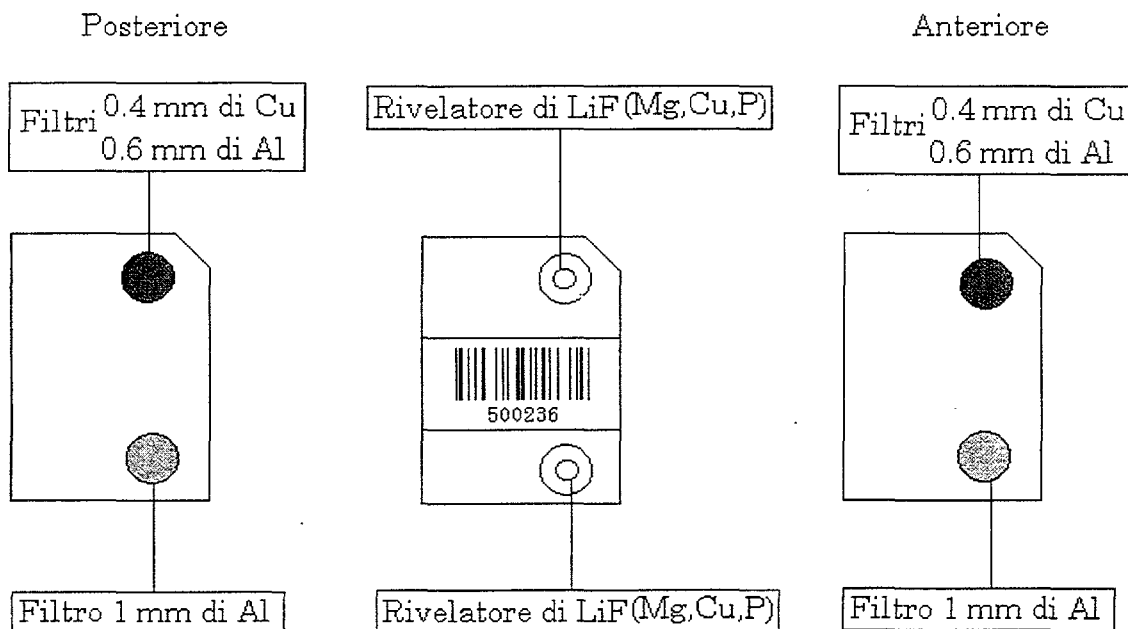


Figura 1: Dosimetro per fotoni (X+γ)

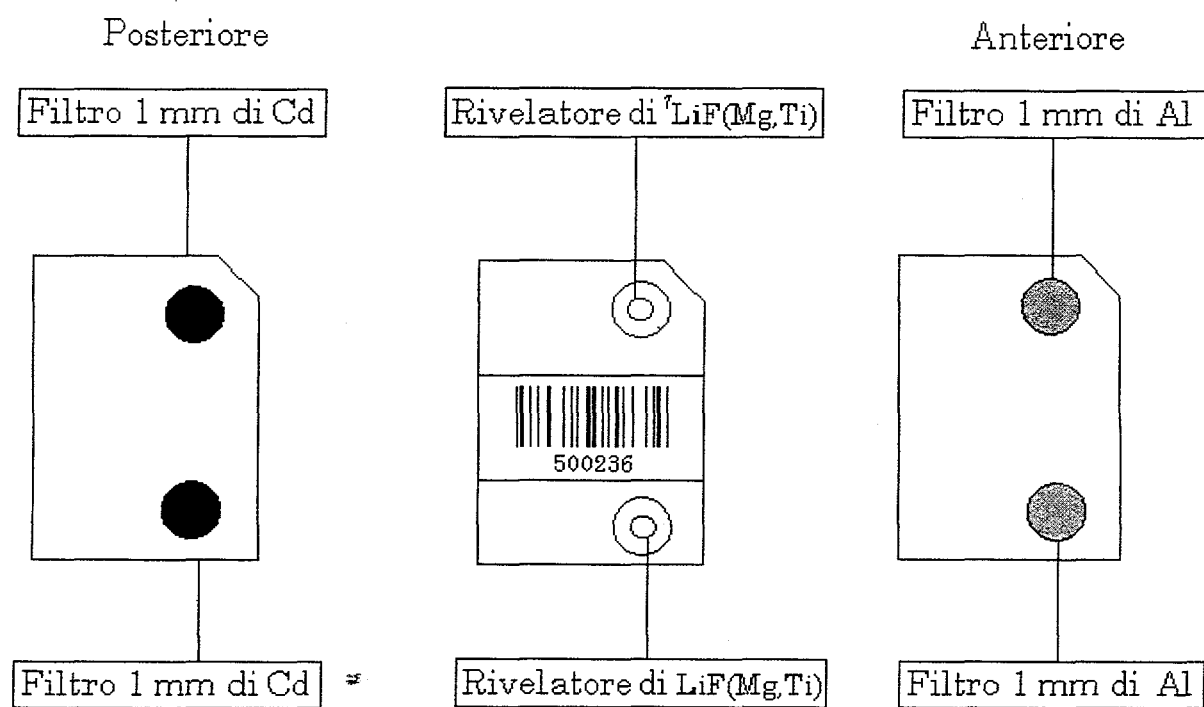


Figura 2: Dosimetro per neutroni termici + gamma

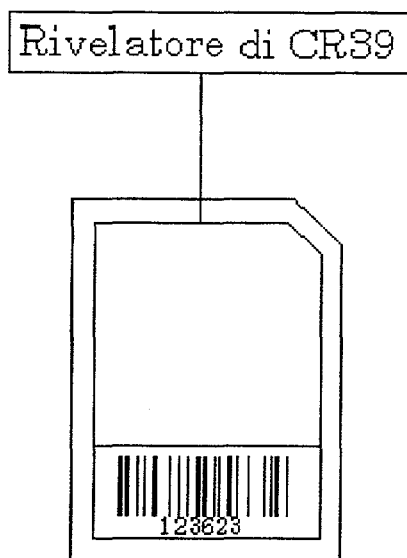


Figura 3: Dosimetro per neutroni veloci

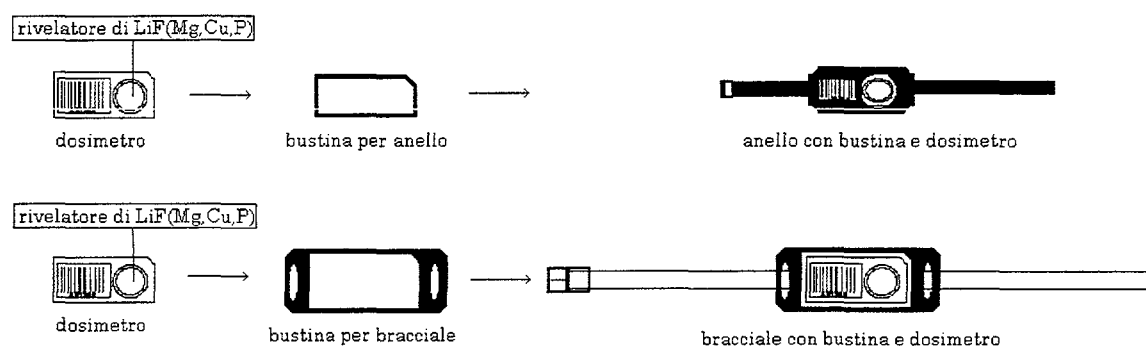


Figura 4: Dosimetro per estremità

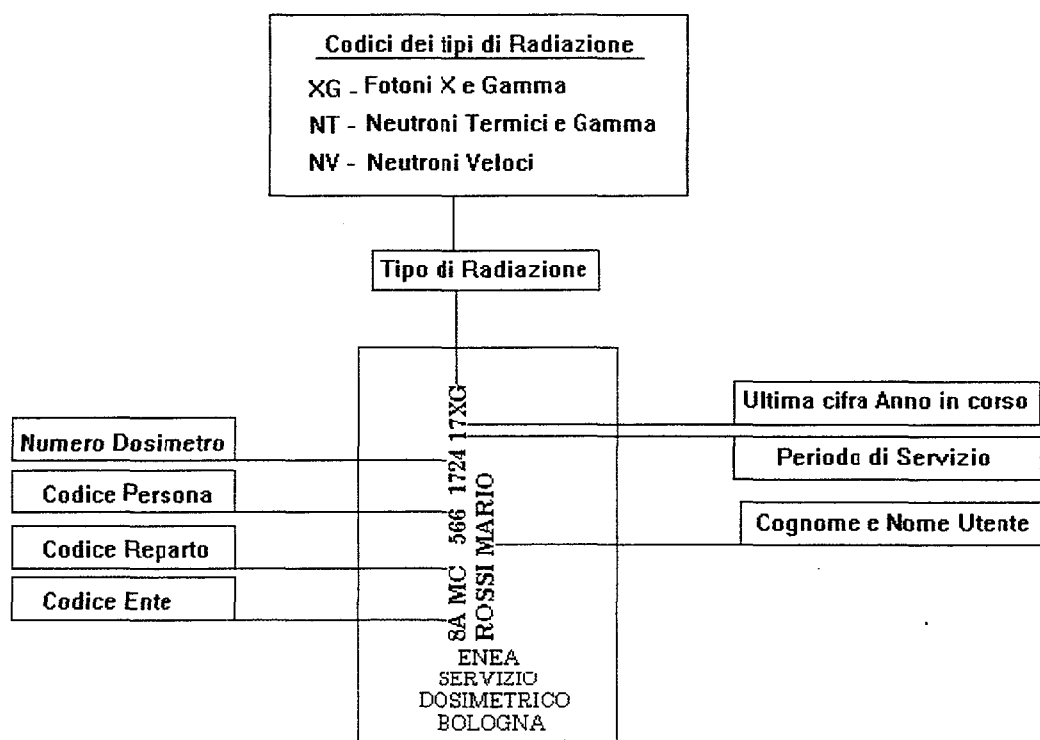


Figura 5: Legenda della codifica di identificazione dei dosimetri per corpo intero

1.1 DOSIMETRO PERSONALE PER RADIAZIONE (X+ γ)

Il dosimetro è costituito da due rivelatori di LiF(Mg,Cu,P) con una differente filtrazione costituita rispettivamente da 1 mm di Al e 0.4 mm Cu + 0.6 mm Al (vedi Fig.1). Tale filtrazione è stata scelta in seguito ad uno studio sulla ottimizzazione della risposta in funzione della energia fotonica incidente (6,7).

La filtrazione è simmetrica, il che rende la risposta del dosimetro indipendente dal verso con cui lo si indossa. Le differenti filtrazioni conferiscono al dosimetro la caratteristica di discriminare l'energia del fascio fotonico incidente. A richiesta è infatti possibile fornire una stima dell'energia equivalente del fascio fotonico incidente.

Le modalità di lettura sono state oggetto di studio al fine di conciliare la prestazione della strumentazione in uso presso il servizio dosimetrico, le esigenze di routine del servizio (circa 8000 dosimetri per periodo) e le prestazioni dosimetriche del materiale termoluminescente che costituisce i rivelatori (8).

Tutti i rivelatori sono stati testati individualmente e di ciascuno è stata determinata la sensibilità intrinseca relativa (9) che permette di correggere per la differente sensibilità individuale dei singoli rivelatori, che può variare del $\pm 50\%$ (10).

Le prove di calibrazione per la caratterizzazione della risposta del dosimetro sono state effettuate presso il Centro di Taratura Secondario dell'IRP di Bologna riconosciuto dal SIT (Sistema Italiano di Taratura). Tutti gli irraggiamenti sono stati effettuati con fasci di riferimento ISO (11).

1.1.1 Principali caratteristiche dosimetriche

Le principali caratteristiche dosimetriche sono le seguenti:

- a) *intervallo di risposta in energia*: da 20 keV a 1.25 MeV¹. Gli irraggiamenti per la calibrazione di routine sono effettuate presso il centro SIT dell'ENEA di Bologna (11).
- b) *dipendenza della risposta nell'intervallo di energia di utilizzo*: $\pm 10\%$. Per ottimizzare la risposta del dosimetro è stato studiato l'effetto di diversi filtri o combinazioni di filtri, posti davanti e dietro il dosimetro, sulla risposta dei rivelatori in funzione dell'energia dei fotoni incidenti. Attraverso una opportuna combinazione di filtri ed una funzione per il calcolo della dose basata sulla loro risposta relativa si è ottenuta una incertezza del $\pm 10\%$ nella determinazione del valore di kerma in aria nell'intervallo di energia 20 keV - 6 MeV (6). Nelle figure 6, 7 e 8 sono riportate le curve di risposta del rivelatore nudo e dei due rivelatori differentemente filtrati in funzione dell'energia.

¹ Alcuni irraggiamenti di prova per valutare la risposta a fotoni di energia superiore a 1.25 MeV sono stati effettuati presso il Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB-Braunschweig) in Germania. I risultati della prova hanno confermato l'estendibilità dell'uso del dosimetro a fotoni di alta energia (4.4 e 6.2 MeV).

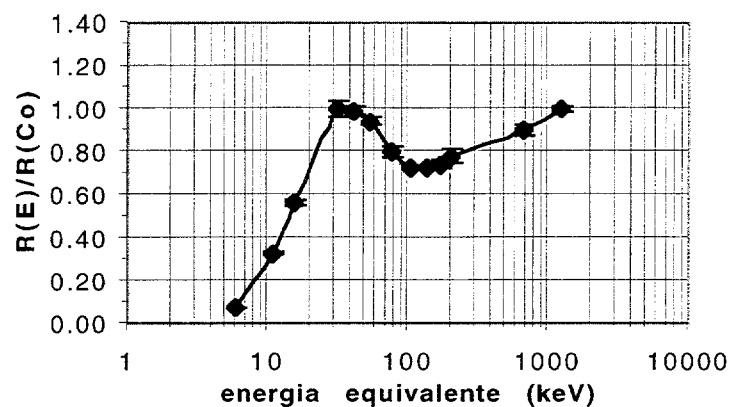


Figura 6: Curva di dipendenza dall'energia di un rivelatore di LiF(Mg,Cu,P)

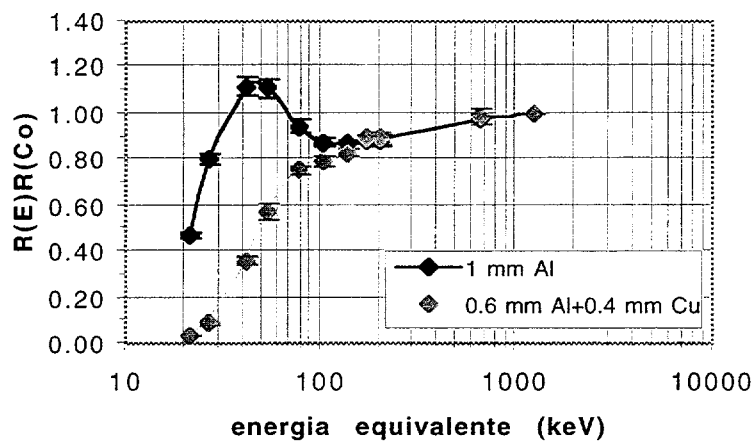


Figura 7: Curva di dipendenza dall'energia dei rivelatori di LiF(Mg,Cu,P) differientemente filtrati

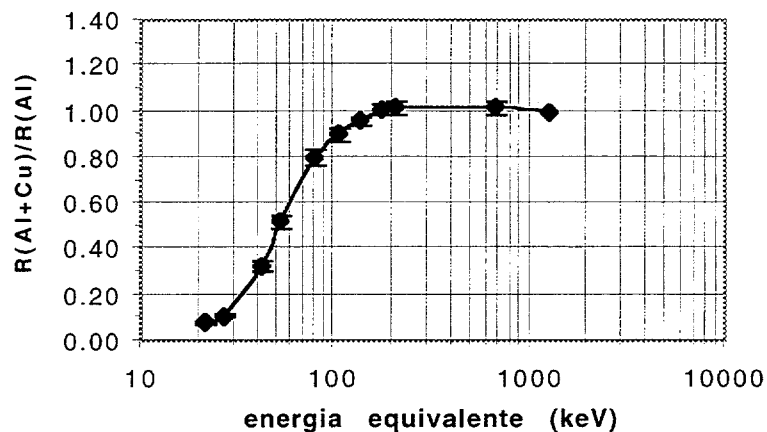


Figura 8: Curva di dipendenza dall'energia del rapporto della risposta dei due rivelatori differientemente filtrati

- c) *soglia di misura nelle attuali procedure di routine* : 0.05 mSv. Il materiale termoluminescente che costituisce i rivelatori è uno dei più sensibili attualmente disponibile. Un rivelatore di LiF(Mg,Cu,P) correttamente trattato permette di rivelare valori di kerma inferiori a 1 μ Gy. Tuttavia, poiché la soglia di misura di un dosimetro utilizzato in routine è determinata dalla riproducibilità di misure di fondo associata alla riproducibilità delle misure di basse dosi e dal valore del fondo ambientale, le quali dipendono a loro volta dalle condizioni di utilizzo e di stoccaggio, non è possibile attribuire al dosimetro un valore di soglia di misura inferiore a 50 μ Sv (12,13,14,15).
- d) *incertezza totale associata ai valori di dose* : risulta dalla combinazione statistica delle incertezze sistematiche (es. dipendenza dall'energia, incertezza della taratura, incertezza associata alla sensibilità intrinseca relativa) e delle incertezze casuali associate alla lettura del dosimetro (es. riproducibilità del sistema di lettura). I valori dell'incertezza totale sono stati raggruppati nei seguenti quattro intervalli:

$0.05 \text{ mSv} \leq H < 0.35 \text{ mSv}$	30%
$0.35 \text{ mSv} \leq H < 0.65 \text{ mSv}$	20%
$0.65 \text{ mSv} \leq H < 3.00 \text{ mSv}$	15%
$3.00 \text{ mSv} \leq H$	10%

- e) *perdita di informazione nel tempo (fading)*: assente. La perdita di informazione da parte di un dosimetro a termoluminescenza è dovuta ad un rilascio da parte del rivelatore dell'energia assorbita dalla radiazione incidente e immagazzinata nel rivelatore prima della lettura di quest'ultimo. Esiste un fading termico o ottico a secondo se provocato da una sorgente di energia termica o da una sorgente di luce (e.g. radiazione ultravioletta). Per il materiale in uso, il fading termico non è misurabile su un intervallo di misura di 6 mesi. Ciò significa che è assente o comunque trascurabile per il periodo di utilizzo. Il fading ottico è a sua volta assente.

- f) *sensibilità ad altri tipi di radiazione (α , β e neutroni veloci)*:

Sia l'involucro in plastica di protezione del dosimetro che la filtrazione metallica dei due rivelatori sono tali da assorbire totalmente le particelle alfa incidenti. Per tale motivo il dosimetro è "cieco" alla radiazione α di qualsiasi energia.

La sensibilità alla radiazione β relativa alla radiazione γ del ^{60}Co , $\eta_{\beta,\gamma}$ del LiF(Mg,Cu,P) è pari a 1 per la radiazione β di una sorgente di $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}^2$ (16). Tuttavia la presenza della filtrazione e del confezionamento influenza la sensibilità del dosimetro. La filtrazione dei rivelatori, infatti, non è indicata per radiazione poco penetrante. Per energie di radiazione beta di una sorgente di $^{204}\text{Tl}^3$, è sufficiente infatti a schermare quasi totalmente il rivelatore dalla radiazione incidente. Alcuni dosimetri sono stati irraggiati con una sorgente $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ per verificarne la prestazione. Ne è risultato che la dose calcolata in routine, se il dosimetro è stato irraggiato nel solo campo beta, è sottostimata di un fattore 2.5. Si noti comunque che le considerazioni sopra valgono per esposizioni al solo campo beta e non ad un campo misto $\gamma + \beta$ per il quale la situazione si fa più complessa. Nel caso vi sia l'esigenza di un monitoraggio individuale alla radiazione β , o $\gamma + \beta$, caso per caso, è possibile associare il dosimetro per fotoni con il dosimetro per estremità, a limitata filtrazione o utilizzare solo quest'ultimo con una specifica calibrazione.

² energia media = 0.8 MeV, energia max = 2.27 MeV

³ energia media = 0.240 MeV, energia max = 0.760 MeV

La sensibilità ai *neutroni termici* relativa alla radiazione γ del ^{60}Co non è trascurabile. La intensità TL causata da un'esposizione ad un campo di neutroni termici di 1 mSv è pari a circa 6 volte quella causata da un'esposizione a un fascio di fotoni di ^{60}Co di 1 mGy (17). Il fattore 6 evidenzia la maggiore energia immagazzinata (proporzionale appunto alla luce emessa) sotto forma di ionizzazione indotta dalla particella alfa prodotta nella reazione nucleare dei nuclei di ^6Li con i neutroni termici incidenti. Questo significa che una dose equivalente di 1 mSv, con la normale elaborazione dei dati, verrebbe attribuita a circa 6 mSv di dose fotonica. Per questo motivo una esposizione in un campo di neutroni termici deve essere evitata e, se inevitabile, è necessario utilizzare in contemporanea il dosimetro per neutroni termici + gamma in grado di discriminare la dose dovuta ai due tipi di radiazione.

La sensibilità ai *neutroni veloci* relativa alla radiazione γ del ^{60}Co del LiF(Mg,Cu,P) è trascurabile, inferiore all'1%, fino ad energie di qualche MeV (18). Tale valore è da considerarsi indicativo anche per il dosimetro confezionato.

1.1.2 Altre informazioni

La dose è calcolata attraverso una taratura al Co corretta attraverso una funzione che tiene conto della curva di risposta in funzione dell'energia. Questo permette di ridurre l'incertezza sistematica dovuta alla dipendenza dall'energia dei fotoni incidenti (fig.7: rivelatore filtrato da 1 mm di Alluminio), pari a $\pm 30\%$, a solo il 10%.

Ai valori di dose calcolati è sottratto un segnale di fondo valutato attraverso l'effettivo periodo di utilizzo e il valore di fondo medio nazionale dovuto alla radioattività ambientale pari a 0.1 mGy/45gg. Il valore comunicato è al netto di tale dose.

I valori di dose sono riportati in mSv in quanto si considera che il valore della dose in tessuto, calcolata secondo la formula $D_T = D_A * (\mu/\rho)_T/(\mu/\rho)_A$ dove $(\mu/\rho)_T/(\mu/\rho)_A$ è pari a 1.10, sia compensata in modo conservativo dalla retrodiffusione creata dal recettore.

Relativamente a questo dosimetro il Servizio Dosimetrico ha superato le prove di verifica dell'affidabilità di un servizio di dosimetria personale effettuate dal Gruppo ENEA-EDP.

Inoltre i risultati di un interconfronto internazionale (XI International Intercomparison of Environmental Dosimeters organizzato dal U.S. Department of Energy - Environmental Measurements Laboratory di New York (19)) hanno confermato la attendibilità di risposta dei suddetti dosimetri anche per valutazioni di dosimetria ambientale. I dosimetri hanno infatti fornito un valore di dose che differisce dal valore vero di solo il 3%.

1.1.3 Sviluppi futuri

Negli ultimi mesi, presso l'IRP è stato ultimato uno studio sulla ottimizzazione della filtrazione dei due rivelatori di LiF(Mg,Cu,P) ai fini di valutare la risposta del dosimetro in termini di $H_p(d)$ con ottimi risultati. Abbiamo infatti dimostrato che sostituendo una sola delle filtrazioni dell'attuale dosimetro e modificando l'algoritmo di elaborazione delle letture, è possibile misurare $H_p(0.07,\alpha)$ rispettivamente nell'intervallo di energia 10 - 200 keV con una incertezza del $\pm 4\%$ e $H_p(10,\alpha)$ nell'intervallo di energia 10 keV - 1.25 MeV con una incertezza massima del $\pm 15\%$ (20, 21).

Pertanto, l'attuale dosimetro sarà sostituito da quello recentemente qualificato non appena $H_p(d)$ sarà recepita ufficialmente come grandezza di riferimento per la dosimetria individuale.

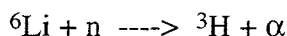
1.2 DOSIMETRO PERSONALE PER NEUTRONI TERMICI E RADIAZIONE FOTONICA ($n_{th} + \gamma$)

Il dosimetro attualmente in uso è costituito da una card contenente un rivelatore di LiF(Mg,Ti) con litio naturale (TLD100) ed un rivelatore arricchito in ^7Li (TLD700) prodotto dalla Harshaw - USA.

Entrambi i rivelatori sono filtrati con 1 mm di Alluminio in posizione anteriore e 1 mm di Cadmio in posizione posteriore rispetto alla direzione di incidenza della radiazione. Il filtro anteriore permette di misurare correttamente in equilibrio di particelle cariche (EPC) fotoni di energia fino a qualche MeV, mentre il filtro posteriore assorbe, attraverso la reazione (n, γ) nei nuclei di Cadmio ($\sigma_{n\text{term}} = 2450$ barn), i neutroni termici incidenti sul retro del dosimetro schermando così la componente termica non presente nel fascio incidente.

La filtrazione, dunque, non è simmetrica. Ciò implica che il dosimetro deve essere indossato con modalità ben definite e precisamente con la faccia contrassegnata con codifica in vista.

La diversa composizione isotopica dei due rivelatori impiegati permette di rivelare e infine discriminare la radiazione fotonica e neutronica incidente. I fotoni vengono infatti rivelati attraverso il processo diretto di ionizzazione (coppie e^- - lacuna) prodotto nel cristallo di LiF. I neutroni termici sono invece rivelati attraverso la reazione nucleare con i nuclei di ^6Li ($\sigma_{n\text{term}} = 937$ barn) presenti nel cristallo:



La particella α induce a sua volta il processo di ionizzazione. Questi fenomeni seppur in diversa quantità avvengono in entrambi i rivelatori. La risposta dei due rivelatori differisce dunque per la diversa sensibilità ai due tipi di radiazione oltre che, inevitabilmente, per la diversa partita di produzione. Pertanto, attraverso una combinazione lineare delle due letture, tenuto conto della diversa sensibilità dei due materiali, è possibile determinare la dose neutronica e stimare la dose fotonica associata.

Si noti che il dosimetro è stato messo a punto per la determinazione della dose relativa ai neutroni termici e, fornisce una stima della dose dovuta alla radiazione fotonica non corretta per la dipendenza energetica del rivelatore. Pertanto non se ne consiglia l'utilizzo in campi di radiazione unicamente fotonica per i quali il dosimetro per X+ γ fornisce un valore di dose più accurato.

Le prove di irraggiamento per la calibrazione di routine sono effettuate presso il Centro SIT dell'ENEA di Bologna

Gli irraggiamenti ai neutroni termici vengono effettuati con sorgenti di Am-Be poste all'interno di un cubo moderatore di polietilene. La caratterizzazione di tale facility in termini di fluenza e di dose equivalente ambientale stato state oggetto di studio e recente qualificazione attraverso misure sperimentali e simulazioni di dosimetria numerica Monte Carlo (MCNP) (22, 23). Inoltre sono stati effettuati interconfronti con altri laboratori per la validazione dei dati di calibrazione.

1.2.1 Principali caratteristiche dosimetriche

Le principali caratteristiche dosimetriche sono le seguenti:

- a.1) *intervallo di risposta in energia della radiazione neutronica*: neutroni termici e di energia fino a 0.4 eV (taglio del Cadmio in termini di densità convenzionale di flusso neutronico (24)).
- a.2) *intervallo di risposta in energia della radiazione fotonica*: 30keV - qualche MeV. Le prove di irraggiamento per la calibrazione di routine sono effettuate presso l'IRP dell'ENEA di Bologna (11).
- b) *dipendenza della risposta nell'intervallo di energia di utilizzo*: $\pm 35\%$. Tale valore si riferisce alla sola componente fotonica. Nella figura seguente è riportata la curva di sensibilità in energia di un rivelatore di LiF(Mg,Ti) filtrato da 1 mm di Alluminio.

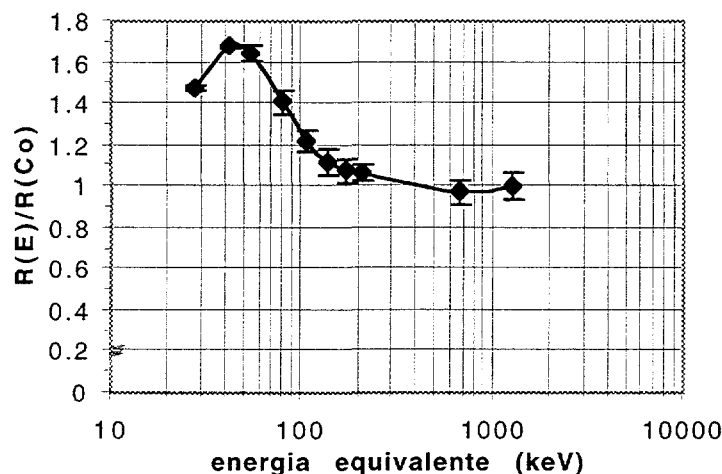


Figura 9: Curva di dipendenza dall'energia di un rivelatore di LiF(Mg,Ti) filtrato con 1 mm di Alluminio

- c) *soglia di misura nelle attuali procedure di routine*: 0.1 mSv. Il LiF(Mg,Ti) è un materiale termoluminescente che, se correttamente trattato, permette di rivelare valori di dose dell'ordine di qualche μGy . Tuttavia, poiché la soglia di misura di un dosimetro utilizzato in routine è determinata dalla riproducibilità di misure di fondo associata alla riproducibilità delle misure di basse dosi e dal valore del fondo ambientale, le quali dipendono a loro volta dalle condizioni di utilizzo e di stoccaggio, non è possibile attribuire al dosimetro un valore di soglia di misura inferiore a 100 μSv (12,13,14).
- d) *incertezza totale associata ai valori di dose* risulta dalla combinazione statistica delle incertezze sistematiche (es. dipendenza dall'energia, incertezza della taratura, incertezza associata alla omogeneità di partita) e delle incertezze casuali associate alla lettura del dosimetro (es. riproducibilità del sistema di lettura). I valori dell'incertezza totale sono stati raggruppati nei seguenti quattro intervalli:

$0.1 \text{ mSv} \leq H < 0.5 \text{ mSv}$	50%
$0.5 \text{ mSv} \leq H < 1 \text{ mSv}$	40%
$1 \text{ mSv} \leq H < 3 \text{ mSv}$	30%
$3 \text{ mSv} \leq H$	20%

- e) *perdita di informazione nel tempo (fading): trascurabile nel periodo di utilizzo.* Per il LiF(Mg,Ti), il fading risulta pari a qualche % in un anno. Tale valore si può considerare trascurabile relativamente al periodo di utilizzo.
- f) *sensibilità ad altri tipi di radiazione (α , β e neutroni veloci):*
 Sia l'involucro in plastica di protezione del dosimetro che la filtrazione metallica dei due rivelatori sono tali da assorbire totalmente le particelle alfa incidenti. Per tale motivo il dosimetro è "cieco" alla *radiazione α* di qualsiasi energia.
 La sensibilità alla *radiazione β* relativa alla radiazione γ del ^{60}Co , $\eta_{\beta\gamma}$, del LiF(Mg,Ti) è pari a 1 per la radiazione β di una sorgente di $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ (16). Tuttavia la presenza della filtrazione e del confezionamento influenza la sensibilità del dosimetro. La filtrazione dei rivelatori, infatti, non è indicata per radiazione poco penetrante. La radiazione beta di energia massima pari a 600 keV è totalmente assorbita nel filtro di alluminio posto di fronte ai rivelatori.
 La sensibilità ai *neutroni veloci* relativa alla radiazione γ del ^{60}Co del LiF(Mg,Ti) è inferiore al 2%, fino a neutroni di qualche MeV (18). Tale valore è da considerarsi indicativo anche per il dosimetro confezionato.

1.2.2 Altre informazioni

La dose neutronica è calcolata con il fattori di conversione per neutroni termici H/Φ (10.7 pSv cm^2) raccomandato dal documento ICRP21 (1).

La dose gamma è calcolata attraverso una taratura al Co corretta per un fattore che media la dipendenza dell'energia (1.35) e fa sì che l'incertezza dovuta all'incognita dell'energia incidente sia pari a $\pm 35\%$.

I valori di dose gamma sono riportati in mSv in quanto si considera che il valore della dose in tessuto, calcolata secondo la formula $D_T = D_A * (\mu/\rho)_T/(\mu/\rho)_A$ dove $(\mu/\rho)_T/(\mu/\rho)_A$ è pari a 1.10, sia compensata in modo conservativo dalla retrodiffusione creata dal recettore.

Ai valori di dose gamma calcolati è sottratto un segnale di fondo valutato attraverso l'effettivo periodo di utilizzo: il valore di fondo medio nazionale dovuto alla radioattività ambientale pari a 0.1 mGy/45gg. Il valore comunicato è al netto di tale dose.

1.2.3 Sviluppi futuri

E' stato ultimato, presso l'IRP, lo studio per la caratterizzazione e la qualificazione di un nuovo dosimetro analogo con ottimi risultati (17). Il nuovo dosimetro è costituito da una card in plastica ABS, analoga a quella del dosimetro per fotoni, contenente due rivelatori sempre con diversa composizione isotopica in Li, di LiF(Mg,Cu,P) commercialmente denominati GR200A e GR207A prodotti da Solid Dosimetric Detector & Method Laboratory - Cina (SDDML).

Questo dosimetro sostituirà quello attuale principalmente per la sua maggiore sensibilità sia alla radiazione fotonica (circa 30 volte superiore) sia ai neutroni termici (circa 10 volte superiore), il che permetterà di abbassare sensibilmente la soglia di misura.

Non appena $H_p(d)$ sarà recepita legalmente come grandezza di riferimento per la dosimetria individuale i dosimetri verranno calibrati su un fantoccio a slab e i valori di dose saranno calcolati applicando il fattore di conversione $H_{p,slab}(10,0^\circ)/\Phi$ pari a 11.4 pSv cm^2 raccomandato dal documento ICRP74 (25).

1.3 DOSIMETRO PERSONALE PER NEUTRONI VELOCI

Il dosimetro è costituito da un rivelatore a tracce di CR-39 (nome commerciale per indicare un polimero poly-allyl-diglicol-carbonate PADC). L'interazione della radiazione neutronica incidente con il materiale plastico produce particelle cariche, particelle α e protoni di rinculo, i quali lungo il loro percorso all'interno del materiale producono un danneggiamento della struttura del polimero. Le tracce sono rese visibili attraverso un attacco chimico che erode il materiale preferibilmente nelle zone di danneggiamento. Il conteggio delle tracce così evidenziate permette la valutazione del flusso dei neutroni incidenti e quindi la valutazione dosimetrica.

La riproducibilità del sistema dosimetrico dipende sia dalla omogeneità di produzione dei fogli di CR-39 che dalla riproducibilità dei processi di sviluppo e di trattamento dei dosimetri. Per questo motivo sono stati intrapresi studi per lo studio e la ottimizzazione di tali modalità (26,27), la caratterizzazione di due tipi di CR39 disponibili sul mercato (28) in termini di sensibilità, segnale di fondo, soglia di rivelazione, risoluzione e rapporto segnale/rumore.

I rivelatori a tracce per dosimetria individuale, ampiamente utilizzati nella routine a livello internazionale e oggetto di ricerca in molti paesi Europei (29), hanno la caratteristica di essere totalmente insensibili alla radiazione fotonica.

Il dosimetro NON è simmetrico, il che significa che il dosimetro deve essere indossato sempre con la faccia contrassegnata con il codice a barre in vista.

Le prove di irraggiamento per la caratterizzazione del dosimetro sono state effettuate presso l'IRP con sorgenti di Am-Be, ^{252}Cf e Pu-Li. Gli irraggiamenti con neutroni monoenergetici sono stati effettuati con l'acceleratore di protoni Van der Graaf del Laboratorio Nazionale dell'INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare) di Legnaro (PD) (30) e con il generatore di neutroni FNG (Frascati Neutron Generator) del Centro ENEA di Frascati che produce neutroni di 14.1 MeV attraverso la reazione $\text{T(d,n)}^4\text{He}$ (31,32).

Attualmente è in uso un materiale CR39 prodotto dalla ditta italiana Intercast Europe S.p.A. (33).

Le prove di irraggiamento per la calibrazione di routine sono effettuate con una sorgente di Am-Be presso l'IRP dell'ENEA di Bologna. Le dosi vengono comunque riportate come Cf equivalenti. Ciò è chiarito nei paragrafi successivi.

1.3.1 Principali caratteristiche dosimetriche

Le principali caratteristiche dosimetriche sono le seguenti:

- intervallo di risposta in energia:* 200 keV - 14 MeV. Gli irraggiamenti per la calibrazione di routine sono effettuate presso l'IRP dell'ENEA di Bologna (34).
- dipendenza della risposta nell'intervallo di energia di utilizzo:* $\pm 50\%$. Nella figura seguente è riportata la curva di sensibilità in funzione dell'energia dei neutroni incidenti. E' importante sottolineare che l'ampio intervallo di variabilità costituisce la principale fonte di errore sistematico. Infatti, applicando nel calcolo dei valori di dose un fattore di taratura ottenuto attraverso un irraggiamento, per esempio, con una sorgente di Am-Be (energia media = 4.3 MeV) e cioè in corrispondenza del picco di sensibilità del materiale, si sottostimano i valori di dose su tutto l'intervallo di energia. Mentre con un fattore di taratura ottenuto attraverso un irraggiamento con una sorgente di ^{252}Cf (energia media = 2.1 MeV) si sottostima per energie inferiori e si sovrastima per energia superiori fino a qualche MeV,

fornendo tuttavia un valore di dose che “media” l’incertezza dovuta alla dipendenza della risposta in energia.

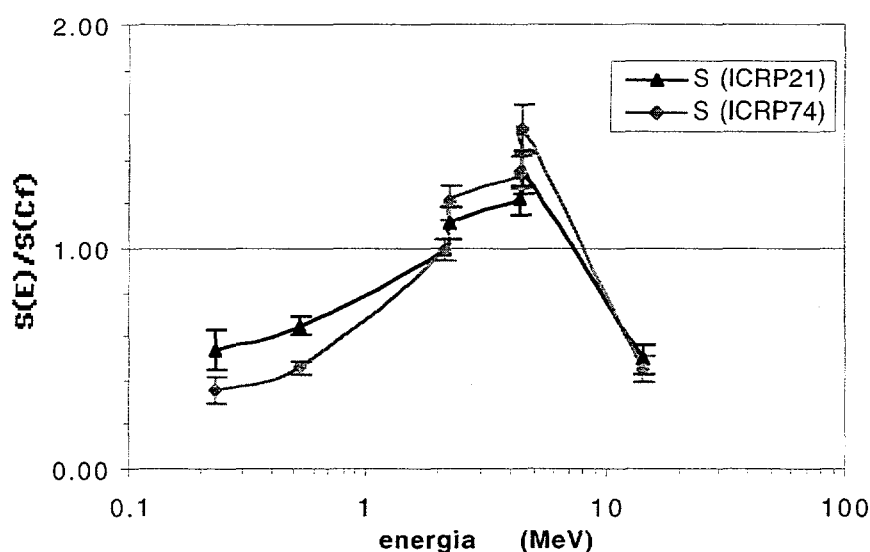


Figura 10: Curva di sensibilità in energia del dosimetro per neutroni veloci normalizzata alla sensibilità al ^{252}Cf

- c) *soglia di misura nelle attuali procedure di routine* : 0.1 mSv. La soglia di misura di un rivelatore utilizzato in routine è determinata dalla riproducibilità di misure di zero (dosimetri non irraggiati) associata alla riproducibilità delle misure di basse dosi e dal valore del fondo ambientale. Per un rivelatore di CR-39 è determinante il segnale di zero che dipende dalla qualità (omogeneità) di produzione dei fogli di CR-39 e dalla riproducibilità delle procedure di trattamento che costituiscono parte integrante del sistema dosimetrico. Nelle attuali condizioni di routine, tenendo come riferimento il ^{252}Cf , è possibile rivelare un valore di dose pari a 0.1 mSv.
- d) *l'incertezza associata ai valori di dose* : risulta dalla combinazione statistica delle incertezze sistematiche (es. incertezza della taratura, risposta in energia) e delle incertezze casuali associate alla lettura del dosimetro (es. riproducibilità del materiale e del sistema di lettura). Poiché per questo tipo di dosimetro l'incertezza dovuta alla risposta in energia è molto significativa, di seguito sono riportati i valori dell'incertezza totale senza e con tale contributo:

	Incetezza misura - $\Delta(E)$	Incetezza totale
$0.1 \text{ mSv} \leq H \leq 0.3 \text{ mSv}$	50%	70%
$0.3 \text{ mSv} < H \leq 0.5 \text{ mSv}$	30%	58%
$0.5 \text{ mSv} < H \leq 1 \text{ mSv}$	25%	56%
$1 \text{ mSv} < H \leq 2 \text{ mSv}$	20%	54%
$2 \text{ mSv} < H$	15%	52%

Nel caso i dosimetri vengano utilizzati in un campo di neutroni veloci di energia nota, infatti, è possibile applicare un fattore di correzione che tenga conto della differenza fra la sensibilità ai neutroni emessi da una sorgente di ^{252}Cf e l'energia del campo di esposizione dei dosimetri (vedi figura 10), riducendo così drasticamente l'incertezza di misura.

- e) *dose equivalente corrispondente al limite di linearità*: 20 mSv (^{252}Cf equivalente). Per vari fenomeni (fra cui i più importanti sono: disomogeneità della soluzione chimica di attacco, distribuzione e dimensioni delle tracce, artefatti di immagine e limitata concentrazione di micro-target sensibili alla radiazione incidente) il numero delle tracce sperimentalmente ottenute non aumenta proporzionalmente con i valori di dose equivalente. Questo fenomeno, a causa del quale si applica un termine di correzione di 2° grado al fattore di taratura lineare del sistema, fa sì che dosi equivalenti superiori a 25 mSv, corrispondenti al numero max di tracce rivelabili, non sono più valutabili correttamente.
- f) *perdita di informazione nel tempo (aging/fading)*: per questo tipo di dosimetri il numero di tracce su dosimetri non irraggiati e conservati in condizioni normali di laboratorio aumenta nel tempo. Questo fenomeno viene classificato come *invecchiamento (aging)* del materiale. Tale fenomeno dipende dal materiale e dalla temperatura di conservazione e non è a priori trascurabile. Tuttavia si tiene conto di tale fenomeno sottraendo ai dosimetri utilizzati in servizio un valore di tracce di fondo corrispondente a un gruppo di dosimetri testimoni di partita.

Il fenomeno di fading, inteso come diminuzione del numero di tracce, si manifesta invece su dosimetri irraggiati. Ciò significa che nel tempo si ha una diminuzione di sensibilità del materiale. L'andamento di tale fenomeno ha un andamento esponenziale nel primo mese dopo la produzione seguito da un tratto lineare all'aumentare del tempo. Pertanto, i dosimetri di taratura di partita sono irraggiati a metà del periodo di utilizzo mediando così i valori di tracce attesi con il fenomeno di fading. In questo modo, il fenomeno non inficia la validità della valutazione di dose.

1.3.1 Altre informazioni

I valori di dose sono calcolati con i fattori di conversione H^*/Φ (Sv cm²/n) riportati nell'ICRP21 (1).

I valori di dose sono forniti attraverso un fattore di taratura relativo alla sorgente di riferimento, ^{252}Cf , di energia media pari a 2.1 MeV. La sorgente di ^{252}Cf è stata scelta come riferimento per due motivi: a) lo spettro di emissione di tale sorgente simula maggiormente lo spettro di un campo di neutroni in ambiente lavorativo, b) permette di mediare l'incertezza sistematica dovuta alla sensibilità in funzione dell'energia dei neutroni incidenti.

Ai valori di dose, per quanto detto al punto f), non è sottratto alcun valore di fondo.

Tutti i dosimetri sono comunque sottoposti ad attacco chimico con dosimetri testimoni di partita, irraggiati e non, che garantiscono la verifica della riproducibilità del sistema. In particolare è possibile mettere in evidenza eventuali segnali di fondo o di variazione di sensibilità del materiale sistematicamente differenti dai valori stimati per la partita in uso.

1.3.1 Sviluppi futuri

Non appena $H_p(d)$ sarà recepita legalmente come grandezza di riferimento per la dosimetria individuale, i dosimetri verranno calibrati su un fantoccio a slab e i valori di dose saranno calcolati applicando i fattori di conversione $H_{p,slab}(10,0^\circ)/\Phi$ raccomandati nel documento ICRP74 (25). In figura 10, è riportata la curva di sensibilità in energia calcolata con i fattori di conversione rispettivamente dell'ICRP21 e ICRP74.

1.4 DOSIMETRO PER ESTREMITÀ PER LA RADIAZIONE X, γ e β

Il dosimetro è costituito da un rivelatore di LiF(Mg,Cu,P) non filtrato. Il rivelatore è fissato su una fascetta di capton contrassegnata sia con un codice a barre che numerico. Tutti i rivelatori sono stati testati individualmente e di ciascuno è stata determinata la sensibilità intrinseca relativa (9,10) che permette di correggere per la differente sensibilità individuale.

La fascetta di capton inserita in una bustina di protezione può essere indossata su un supporto ad anello o a bracciale (fig. 4). La bustina di protezione non è sigillata e perciò il dosimetro non è a tenuta di liquido. Tuttavia ai fini di una sterilizzazione dei dosimetri attraverso immersione in liquido sterilizzante, è possibile la fornitura di analoghe bustine termosaldate. Ciò comunque non avviene nelle normali procedure di routine.

Le prove di irraggiamento per la caratterizzazione del dosimetro sono state effettuate anche in questo caso presso il Centro SIT dell'ENEA di Bologna.

1.4.1 Principali caratteristiche dosimetriche

Le principali caratteristiche dosimetriche sono le seguenti:

- a) *intervallo di risposta in energia*: da 15 keV a 300 keV. Gli irraggiamenti per la calibrazione di routine sono effettuate presso il centro SIT dell'IRP dell'ENEA (11,35).
- b) *dipendenza della risposta nell'intervallo di energia di utilizzo*: $\pm 25\%$. Il rivelatore è filtrato dalla sola bustina di plastica di protezione. Pertanto la dipendenza della risposta in funzione della energia è quella del LiF(Mg,Cu,P) riportata in figura 6.
- c) *soglia di misura nelle attuali procedure di routine*: 0.05 mSv. Il materiale termoluminescente che costituisce i rivelatori è uno dei più sensibili attualmente disponibile. Un rivelatore di LiF(Mg,Cu,P) correttamente trattato permette di rivelare valori di kerma inferiori a 1 μ Gy. Tuttavia, poiché la soglia di misura di un dosimetro utilizzato in routine è determinata dalla riproducibilità di misure di fondo associata alla riproducibilità delle misure di basse dosi e dal valore del fondo ambientale, le quali dipendono a loro volta dalle condizioni di utilizzo e di stoccaggio, non è possibile attribuire al dosimetro un valore di soglia di misura inferiore a 50 μ Sv (12,13,14,15).
- d) *incertezza totale associata ai valori di dose*: risulta dalla combinazione statistica delle incertezze sistematiche (es. dipendenza dall'energia, incertezza della taratura, incertezza associata alla sensibilità intrinseca relativa) e delle incertezze casuali associate alla lettura del dosimetro (es. riproducibilità del sistema di lettura). I valori dell'incertezza totale sono i seguenti:

$0.05 \text{ mSv} \leq H < 0.30 \text{ mSv}$	40%
$0.30 \text{ mSv} \leq H < 3 \text{ mSv}$	30%
$3 \text{ mSv} \leq H$	25%

- e) *perdita di informazione nel tempo (fading)*: assente. Per il LiF(Mg,Cu,P), il fading non è misurabile su un intervallo di 6 mesi. Ciò significa che è assente o comunque trascurabile per il periodo di utilizzo (3 mesi).
- f) *sensibilità ad altri tipi di radiazione* (α , β e neutroni termici e veloci): la bustina di plastica di protezione del rivelatore è sufficiente per assorbire le particelle alfa incidenti. Per tale motivo il dosimetro è "cieco" alla radiazione α di qualsiasi energia.

In Tabella 1 sono riportati i valori della sensibilità alla radiazione β $\eta_{\beta X}$, del dosimetro confezionato ottenuti sperimentalmente per le sorgenti di riferimento ISO per la calibrazione

dei dosimetri alla radiazione β (34). I valori sono normalizzati alla sensibilità del dosimetro alla radiazione X di energia equivalente di 205 keV, alla quale si riferisce il fattore di taratura. Nel caso i dosimetri siano esposti alla radiazione beta di una delle sorgenti in tabella, o di energia intermedia, è necessario correggere (dividere) i valori di dose comunicati con i fattori $\eta_{\beta x}$ riportati. Il dosimetro confezionato è comunque insensibile alla radiazione beta di energia massima pari a 30 keV.

Tabella 1: Sensibilità alla radiazione beta relativa alla radiazione fotonica di calibrazione (energia equivalente 205 keV).

Sorgente beta	Energia β max (MeV)	Energia β media (MeV)	$\eta_{\beta x}$
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	2.270	0.800	1.15
^{204}Tl	0.760	0.240	0.20
^{147}Pm	0.230	70-80	0.01

La sensibilità ai *neutroni termici* relativa alla radiazione γ del ^{60}Co , $\eta_{n\gamma}$, non è trascurabile (vedi punto f) paragrafo 1.1.1). Per questo motivo una esposizione in un campo di neutroni termici deve essere evitata

La sensibilità ai *neutroni veloci* relativa alla radiazione γ del ^{60}Co , $\eta_{n\gamma}$, del LiF(Mg,Cu,P) è trascurabile, inferiore all'1%, fino ad energie di qualche MeV (18). Tale valore è da considerarsi indicativo anche per il dosimetro confezionato.

1.4.2 Altre informazioni

I valori di dose forniti sono calcolati attraverso un fattore di taratura riferito ad una energia X equivalente di 205 keV. Ai valori di dose calcolati è sottratto un segnale di fondo valutato attraverso l'effettivo periodo di utilizzo e il valore di fondo medio nazionale dovuto alla radioattività ambientale pari a 0.1 mGy/45gg. Il valore comunicato è al netto di tale sottrazione.

I valori di dose sono riportati in mSv in quanto si considera che il valore della dose in tessuto, calcolata secondo la formula $D_T = D_A * (\mu/\rho)_T/(\mu/\rho)_A$ dove $(\mu/\rho)_T/(\mu/\rho)_A$ è pari a 1.10, sia compensata in modo conservativo dalla retro-diffusione creata dal recettore.

1.4.3 Sviluppi futuri

Attualmente è in corso uno studio per la caratterizzazione dello stesso dosimetro in termini di Hp(0.07) attraverso prove sperimentali di irraggiamento con fantocci standard ISO (36) per estremità. Essi sono costituiti rispettivamente da un cilindro di PMMA con diametro di 19 mm e lunghezza 300 mm, per i dosimetri da indossare al dito (anelli), e da un cilindro di PMMA cavo, riempito d'acqua, con un diametro esterno di 73 mm e lunghezza 300 mm, per i dosimetri da indossare al polso o alla caviglia (bracciali).

1.5 DOSIMETRO DI CRITICITA'

Un incidente di criticità consiste nello sviluppo incontrollato di una reazione nucleare a catena in un mezzo solido o liquido, con emissione di radiazione elettromagnetica e neutronica di grande intensità. L'impiego e la necessità dei dosimetri di criticità, legata principalmente all'energia nucleare, è ovviamente drasticamente diminuita rispetto agli anni 70.

Il dosimetro di criticità dell'ENEA è stato messo a punto e qualificato dai ricercatori del CNEN proprio in quegli anni (37). Recentemente, il sistema dosimetrico è stato verificato, aggiornato e riquilibrato attraverso un interconfronto internazionale per dosimetria di criticità, che ha avuto luogo presso il reattore SILENE a Valduc (Francia) (38).

Il sistema dosimetrico è costituito dall'associazione di dosimetri ambientali e personali contenenti rivelatori ad attivazione per la dosimetria del campo neutronico e a termoluminescenza per la dosimetria del campo gamma.

Il dosimetro ambientale, fondamentale per la determinazione dello spettro della componente neutronica del campo di radiazione, ha come elemento base il sistema ad attivazione SNAC, messo a punto e tarato dal Commissariat à l'Energie Atomique (Francia) (39).

Lo SNAC, nella sua versione SNAC 50, è costituito da una scatola cilindrica di cadmio che racchiude quattro dischi, di diametro 50 mm e di diverso spessore, di rivelatori ad attivazione a soglia e a risonanza rispettivamente di zolfo, oro, rame, e magnesio. Dalla combinazione delle misure effettuate su ciascuno di essi è possibile ricostruire lo spettro neutronico incidente. Allo SNAC è annesso un rivelatore a termoluminescenza di ossido di berillio per la rivelazione della componente gamma.

Il dosimetro personale è costituito da due parti, una principale e un'appendice, e racchiuso in un involucro di PVC. Nella parte principale sono contenuti dischi di diverso spessore e diametro rispettivamente di: oro, rame, zolfo e indio. L'appendice contiene due rivelatori di BeO e un disco di zolfo, identico a quello contenuto nella parte principale. Esso ha lo scopo di fornire un controllo a posteriori delle misure effettuate in loco sui rivelatori della parte principale subito dopo l'incidente, quando, nella fretta, sono possibili sviste ed errori.

E' possibile indossare più dosimetri personali posti su una cintura al fine di ottenere informazione dell'orientazione della persona rispetto alla sorgente.

Le misure di attività dei rivelatori ad attivazione contenuti in entrambi i dosimetri vengono effettuate con un contatore G-M a finestra frontale con riempimento neon-argon-alogeno. I risultati delle misure vengono poi elaborati attraverso un software dedicato (che è stato oggetto di aggiornamento nel corso del recente interconfronto sopracitato) con il quale è possibile effettuare la deconvoluzione dei dati e ricostruire così lo spettro del fascio neutronico incidente.

Noto lo spettro energetico e la fluenza dei neutroni incidenti, insieme alla dose gamma ottenuta semplicemente dal rivelatore di ossido di berillio, è possibile determinare il valore equivalente di dose totale.

CAPITOLO 2. MODALITÀ DI GESTIONE E FORNITURA DEI DOSIMETRI E COMUNICAZIONE E ARCHIVIAZIONE DEI DATI DOSIMETRICI

La gestione di un servizio dosimetrico è parte integrante della qualità del servizio fornito e richiede una serie di operazioni che devono essere seguite con scrupolosità e precisione. Per tale motivo la maggior parte delle operazioni sono state automatizzate, il che rende più affidabile le procedure di gestione leggermente a scapito della flessibilità. Ciò è stato possibile attraverso una rete di computer dedicata al Servizio Dosimetrico. Il software di gestione della intera rete, di interfaccia per i vari strumenti (lettori, macchina confezionatrice, lettori ottici di codice a barre, di database ed elaborazione dei dati) è stato tutto realizzato da personale Enea e adattato alle specifiche esigenze del servizio dosimetrico. Inoltre, per casi particolari, sono state previste opzioni, costituite sempre da procedure automatiche, che permettono di eseguire le operazioni con modalità e tempi differenti da quelli prestabiliti in routine.

2.1 L'ARCHIVIO DEI DATI

L'archivio del Servizio Dosimetrico è costituito da dati di diversa natura. Si può considerare suddiviso in una serie di archivi minori (database) contenenti rispettivamente dati relativi:

- agli Enti utenti
- alle persone controllate
- ai codici a barre dei dosimetri disponibili
- ai dosimetri relativamente a ciascun periodo

L'accesso incrociato ai quattro archivi permette di ricostruire la storia dosimetrica di ogni dosimetro e/o di ogni persona a secondo dell'esigenza.

L'archivio degli Enti utenti contiene tutte le informazioni utili: il codice Ente (due caratteri alfanumerici), il nominativo dell'Ente, nominativo e recapito responsabile, recapito amministrativo, recapito invio dosimetri, partita IVA e/o codice fiscale, note fattura, etc.

L'archivio delle persone controllate è stato creato principalmente per scopi statistici. Esso contiene ovviamente il nominativo dell'utilizzatore, i dati anagrafici, il sesso, la mansione, l'ente di appartenenza, l'eventuale reparto di appartenenza, l'indicazione del tipo di dosimetri utilizzati e delle parti del corpo controllate (corpo intero e/o estremità), la data di inizio controllo dosimetrico e le eventuali dosi precedenti a tale data.

Il dosimetro è un'entità "fisica" identificata dal codice a barre, che costituisce il "nome e cognome" della card contenente i rivelatori, e "dosimetrica" identificata dal numero del dosimetro a cui è abbinato il codice ente e il codice persona, che, come elementi di altri due archivi distinti, contengono implicitamente il resto dei dati utili. La parte fisica è ovviamente fissa mentre quella dosimetrica cambia poiché una card è utilizzata più volte. Infatti un certo codice a barre, unico nell'archivio dei dosimetri "fisici" disponibili, può avere più numeri di dosimetro nella sua vita, tutti comunque diversi, e cioè tanti quante sono le volte (i periodi) in cui è stato utilizzato.

L'archivio dei codici a barre contiene l'elenco di tutti i dosimetri fisicamente disponibili al Servizio che potranno via via essere utilizzati fino ad un massimo di 4 volte l'anno (2 per i dosimetri per estremità e per neutroni veloci). Al momento dell'utilizzo uno specifico dosimetro è associato ad un certo periodo e il suo codice a barre abbinato ad un certo utilizzatore. Questo significa che gli sarà assegnato un numero di dosimetro all'interno del periodo di utilizzo a cui sarà abbinato sia il suo codice a barre che tutti i dati temporanei (validi solo per quel periodo) relativi a ente, utilizzatore, lettura e dose.

Nell'archivio dei codici a barre sono specificati anche i coefficienti di sensibilità intrinseca relativa, dell/i rivelatore/i contenuti in ciascun dosimetro. Quando un dosimetro è in uso nell'archivio dei codici a barre viene registrato il codice ente, il codice persona, il numero di dosimetro assegnato e il periodo relativo. Tali dati, al termine dell'utilizzo cioè dopo la lettura non sono più validi e vengono cancellati dall'archivio dei codici a barre. Essi rimangono in memoria permanente solo nell'archivio dei dosimetri del periodo in questione di seguito descritto.

L'archivio dei dosimetri è l'archivio relativo al numero del dosimetro che identifica univocamente un dosimetro quando è utilizzato. Esso è un numero di 8 cifre: le prime 3 individuano rispettivamente il tipo di dosimetro (1 = estremità, 2 = X+ γ , 3 = neutroni termici+ γ , 4 = neutroni veloci), il periodo di utilizzo (numero da 1 a 8), e l'ultima cifra dell'anno solare di utilizzo (8 per 1998). Le ultime cinque cifre, invece, corrispondono al numero progressivo del dosimetro all'interno della lista di spedizione del periodo in cui il dosimetro appartiene. L'archivio dei dosimetri è a sua volta costituito dall'archivio della parte "dosimetrica" corrente e cioè relativa al periodo di utilizzo e da una serie di file corrispondenti a ciascun periodo. Per esempio, il file "dosi198" contiene l'insieme delle informazioni "fisiche" e "dosimetriche" per il periodo 1 dell'anno 1998. Ogni suo record, infatti, contiene: il numero di dosimetro, il codice e il nominativo dell'ente di appartenenza, il codice e il nominativo dell'utilizzatore, i dati relativi alla lettura, lettore utilizzato e infine il dato dosimetrico calcolato insieme all'incertezza associata.

2.2 MODALITÀ DI GESTIONE E FORNITURA DEI DOSIMETRI

Le operazioni di gestione dei dosimetri sono schematicamente riassunte nello schema riportato in figura 11. Si è cercato di automatizzare il più possibile le varie fasi di lavoro per rendere più rapida l'esecuzione e soprattutto per eliminare le possibilità di errori dovuti a procedure non rispettate.

1. L'archivio del servizio è costantemente aggiornato sia per quanto riguarda i dati dosimetrici che anagrafici e/o amministrativi di ciascun utilizzatore. Fino a 20 giorni prima dell'inizio del periodo di utilizzo, l'Utente può comunicare eventuali variazioni sul numero o sui nominativi dei dosimetri da predisporre per il suo Ente. Tali variazioni vengono inserite nell'archivio che risulta così quotidianamente aggiornato. Per motivi organizzativi, ciò non è possibile nei giorni immediatamente precedenti l'invio dei dosimetri in quanto le fasi di confezionamento e abbinamento richiedono che l'archivio degli utilizzatori rimanga "congelato" per tutta la durata delle operazioni di preparazione della spedizione dei dosimetri.
2. La spedizione dei dosimetri di ogni periodo è costituita da un numero variabile di dosimetri tutti comunque contrassegnati dal "numero del dosimetro". Venti giorni prima dell'inizio del periodo di utilizzo, è noto, per ciascun ente, il numero dei dosimetri di ciascun tipo, divisi eventualmente per reparto, richiesti per tale periodo e l'elenco nominativo degli utilizzatori. Questa lista è ancora però incompleta, poichè non contiene il codice a barre della card che verrà assegnato, nella fase successiva al momento del confezionamento, al singolo utilizzatore. In questa fase è possibile però stampare la "lista pacchi", costituita dall'elenco degli enti utenti con il corrispondente quantitativo dei dosimetri, divisi per tipo di dosimetro, che servirà nella fase di spedizione dei dosimetri ai singoli Utenti.

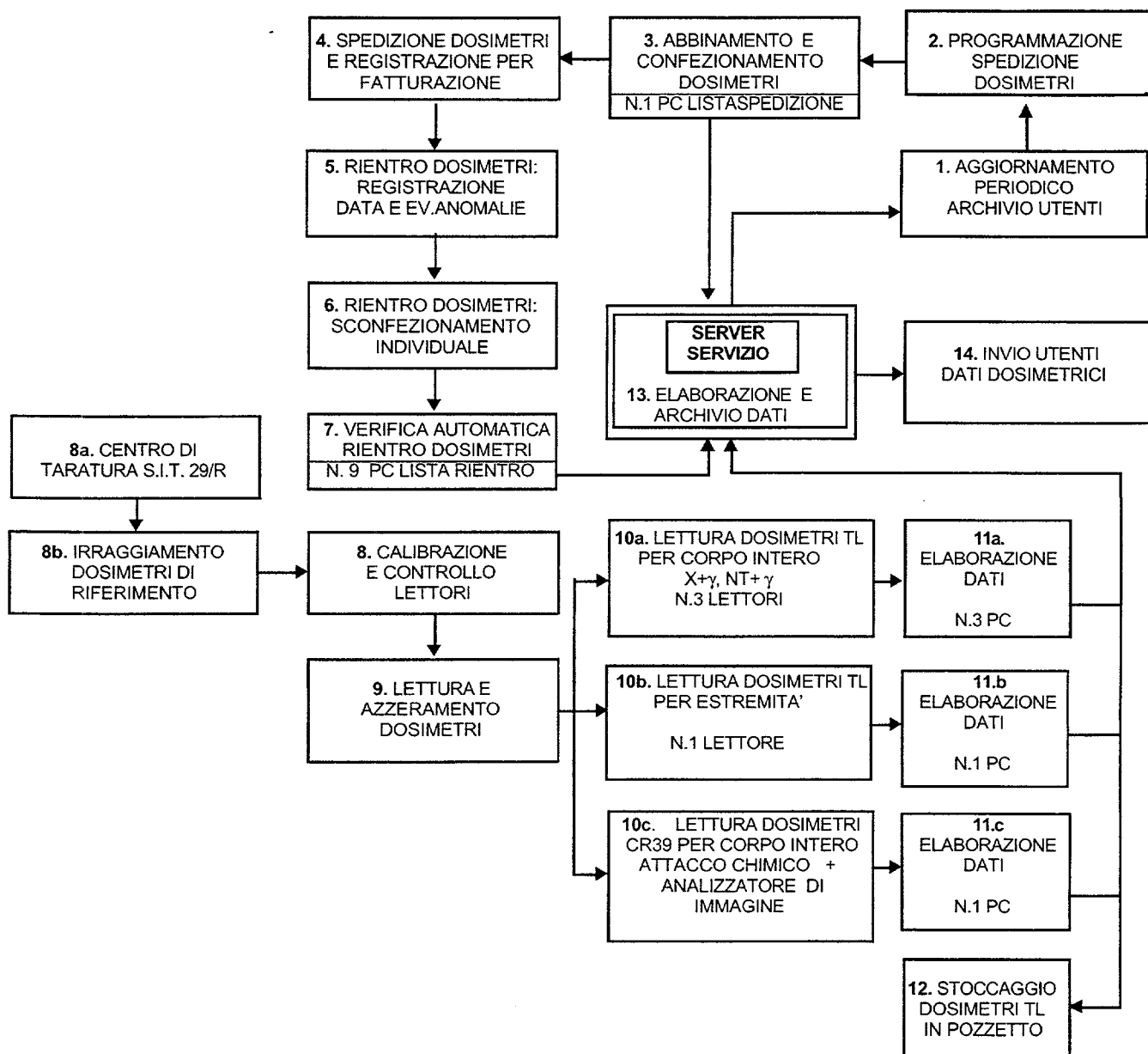


Figura 11: Schema organizzativo del Servizio Dosimetrico dell'IRP dell'ENEA

3. Il confezionamento dei dosimetri per corpo intero avviene in modo automatico con una macchina confezionatrice recentemente acquisita in grado di impacchettare fino a 40 dosimetri al minuto. La macchina è dotata di un lettore laser che legge il codice a barre di ciascuna card, lo invia al computer che abbina tale codice con il nominativo della lista di spedizione. I dosimetri al termine del confezionamento sono stati assemblati e impacchettati in una bustina di protezione, recante il logo **ENEA**, che presenta il foro per l'inserimento del gancio e l'invito per l'apertura utile al momento dello sconfezionamento. Sulla bustina viene stampato, sempre in modo automatico dalla macchina confezionatrice, la codifica completa (vedi fig.5) attraverso una stampante a getto di inchiostro.

I dosimetri per estremità vengono invece confezionati manualmente. Ciò significa che sia l'abbinamento del barcode che l'inserimento nella bustina di protezione è effettuato da un operatore.

Al termine del confezionamento, che avviene in ordine di tipo di dosimetro, il computer associato alla macchina confezionatrice contiene la "lista di spedizione" completa contenente la lista di enti e dei dosimetri abbinati univocamente al codice del dosimetro, al codice a barre della card e all'utilizzatore. Tale lista viene quindi trasferita al server.

Allo stesso modo, dal PC con cui si effettua l'abbinamento dei dosimetri per estremità si trasferisce la lista di spedizione completa per tale tipo di dosimetri. La lista dei dosimetri e dei nominativi abbinati relativi a tale periodo di utilizzo viene dunque archiviato.

4. A questo punto i dosimetri vengono suddivisi, aiutandosi con la lista pacchi preparata in fase 2, per tipo e per ente e confezionati nei pacchi di spedizione. All'interno di ciascuna busta o pacco è inserita la lista di spedizione, la cui ultima pagina costituisce la certificazione della fornitura del periodo in questione valido ai fini della fatturazione. I pacchi da spedire via posta e/o raccomandata vengono numerati e pesati. Al termine di questa fase si produce la lista utile per l'affrancatura degli stessi. I pacchi da spedire in modo differente vengono inviati secondo le modalità richieste dall'Utente.
5. Al rientro dei dosimetri al servizio dosimetrico viene annotata la data di rientro in appositi registri contenenti la lista di spedizione di ogni ente ed eventuali anomalie di confezionamento verificatisi sui singoli dosimetri. Ciò è necessario perchè spesso i dosimetri non rientrano tutti alla normale data di scadenza.
6. Lo sconfezionamento dei dosimetri è manuale. Durante questa procedura i dosimetri di ogni Utente vengono suddivisi per tipo di dosimetro: $x+\gamma$, $nt+\gamma$, neutroni veloci ed estremità. Successivamente i dosimetri per corpo intero vengono estratti dalla busta di plastica protettiva e i dosimetri divisi dai supporti e/o filtri. I dosimetri per estremità vengono invece estratti dalla busta di protezione al fine di inserirli in supporti specifici solo al momento della lettura.
7. Prima della lettura, viene effettuato un controllo automatico del rientro dei dosimetri attraverso un programma dedicato che crea la "lista di rientro" che, confrontata con la lista di spedizione permette di evidenziare i dosimetri non rientrati. Tale controllo può essere effettuato da qualsiasi PC della rete del Servizio dosimetrico con un lettore ottico di codice a barre o dalla stessa macchina confezionatrice e PC associato.
8. Prima della lettura dei dosimetri i lettori per i dosimetri a termoluminescenza vengono calibrati attraverso la lettura dei dosimetri di riferimento, precedentemente irraggiati presso il nostro Centro S.I.T. Attraverso questa fase la prestazione di tali strumenti viene verificata. Attraverso la lettura dei dosimetri di riferimento vengono definiti i "fattori di taratura" delle singole catene di lettura (due per ogni lettore).

In questa fase vengono anche letti n. 10 dosimetri di "zero" che permettono di definire per il valore dello zero strumentale per ciascuna catena di lettura. Tutte le operazioni di questa fase vengono effettuate secondo una procedura standard e annotate su un registro apposito che testimonia la prestazione degli strumenti nel tempo.

Per la dosimetria per neutroni veloci, invece, viene irraggiato un certo numero di dosimetri ad un valore noto di dose equivalente con una sorgente di Am-Be. Essi insieme a dosimetri non irraggiati, appartenenti alla stessa partita, serviranno come dosimetri di controllo della riproducibilità della intera procedura di trattamento dei dosimetri e del fattore di taratura applicato.

9. I dosimetri suddivisi per tipo vengono avviati alle singole procedure di lettura. Il ciclo termico previsto per tutti i tipi di dosimetri a termoluminescenza costituisce contemporaneamente il ciclo di lettura e di azzeramento dei dosimetri. Tale ciclo è stato oggetto di studio e di ottimizzazione (3).
10. a) La lettura dei dosimetri a termoluminescenza per corpo intero avviene con lettori automatici Vinten mod.823 e 814. I lettori, nonostante presentino una elettronica di costruzione differente, sono resi analoghi dal software di interfaccia. Essi sono infatti tutti collegati ad un PC che permette la visione simultanea sullo schermo sia dei valori di lettura, associati attraverso il software di database, all'utilizzatore abbinato al dosimetro in lettura, che delle curve di emissione dell'intensità TL, *glow curve*, dei singoli rivelatori.
b) I dosimetri per estremità prima della lettura vengono inseriti in supporti "a card" per permetterne la lettura. Il ciclo termico previsto per tutti i tipi di dosimetri costituisce contemporaneamente il ciclo di lettura e di azzeramento dei dosimetri. Tale ciclo è stato oggetto di studio e di ottimizzazione (3).
c) I dosimetri per neutroni veloci di CR39 vengono invece gestiti in modo manuale. Essi vengono sviluppati attraverso un attacco chimico (max 250 dosimetri per attacco) che permette di rendere visibili le tracce dovute ai neutroni veloci incidenti. I dosimetri sono sottoposti ad un preattacco in soluzione composta da 60% di alcol etilico e 40% di soluzione 6.25 N di KOH, seguito da un attacco a 70°C di 12 ore in una soluzione 6.25N di KOH (25,26). La lettura avviene attraverso una procedura semi-automatica attraverso un microscopio ottico (Leitz-M3Z Wild) collegato attraverso una telecamera ad un analizzatore di immagine (Optomax V). Infine, i dati di lettura vengono elaborati attraverso un programma dedicato e successivamente inseriti nell'archivio dosimetrico.
11. L'elaborazione dei dati avviene attraverso un software dedicato a ciascun tipo di dosimetro e relativa procedura.
12. Immediatamente dopo la lettura e quindi l'azzeramento, i dosimetri a termoluminescenza vengono immagazzinati in un pozzetto schermato le cui schermature sono tali da ridurre la dose ambientale di un fattore 4 ($0.025 \mu\text{Sv/h}$). Questa operazione è indispensabile per i dosimetri a termoluminescenza al fine di ridurre al minimo la dose ambientale assorbita presso l'Enea, di cui comunque si tiene conto nell'algoritmo di calcolo (15). Per i dosimetri di CR-39 invece tale fase non è necessaria in quanto si tratta di dosimetri non riutilizzabili e quindi dopo la lettura vengono semplicemente archiviati in apposite scatole e conservati ai fini di poterne reiterare una lettura.
13. I dati comunicati al server dai PC associati a ciascun strumento o procedura di lettura vengono archiviati. L'archivio è dunque aggiornato.
14. Al termine di queste fasi è dunque possibile stampare i tabulati di dose da inviare agli Utenti. I dati relativi a comunicazioni urgenti, sia perché i valori di dose hanno superato i livelli di allarme stabiliti (attualmente: 4.5 mSv per dosi a corpo intero e 7.5 mSv per dosi a estremità) sia perché specificamente richiesto dall'Utente, vengono stampati e spediti quotidianamente.

Naturalmente, come già accennato, allo schema brevemente descritto è possibile e in certi casi necessario apportare delle modifiche.

Per esempio, è possibile effettuare l'invio di dosimetri secondo le modalità standard ma in periodi differenti dalle scadenze derivanti dalla periodicità fissa di utilizzo. E' infatti abbastanza frequente che un Utente necessiti in modo urgente di dosimetri. In questo caso si procede alla preparazione dei dosimetri, che vengono inseriti nel periodo corrente, secondo la modalità

“fuori spedizione” sempre gestita da un software dedicato che permette di aggiornare l’archivio modificando la “lista di spedizione”. In questo caso i dosimetri inseriti avranno un numero progressivo in coda all’ultima spedizione effettuata. Tuttavia, si invitano gli Utenti a limitare questi casi “eccezionali”, soprattutto per un numero limitato di dosimetri, per ovvie ragioni organizzative. Si consiglia pertanto l’inserimento nell’elenco dei dosimetri richiesti di ciascun ente di alcuni dosimetri di scorta, denominati “anonimi”.

Un’altra eccezione nelle procedure standard riguarda lo stoccaggio di dosimetri a termoluminescenza per radiazione fotonica, sia per corpo intero che per estremità, che hanno assorbito una dose superiore a 2 mSv. Secondo gli studi effettuati, a seguito del trattamento termico, il segnale residuo in ciascun rivelatore a TL è minore o uguale all’1% (8). Pertanto, si è stabilito un “limite di riassetto” affinché il segnale residuo non risulti significativo rispetto alla soglia di misura del sistema dosimetrico (15). I dosimetri in questione vengono evidenziati con segnale acustico al momento della lettura, tutti i dati relativi vengono registrati su un file, detto “file degli errori”.

Nel “file degli errori” vengono registrati tutti i dati relativi ad anomalie e/o eccezioni avvenute nel corso della lettura dei dosimetri. Le anomalie vengono segnalate in modo automatico attraverso l’inserimento nel programma di lettura ed elaborazione dei dati di parametri di controllo che identificano differenti inconvenienti possibili. Nel caso in cui l’inconveniente presuppone una elaborazione speciale dei dati di lettura, questi dati vengono registrati nel file degli errori ma non automaticamente nell’archivio dosimetrico. Quotidianamente, i dati nel file degli errori vengono controllati, eventualmente elaborati attraverso una procedura off-line da parte del responsabile del servizio e successivamente inseriti manualmente nell’archivio dosimetrico. I dati inseriti manualmente sono comunque identificabili da un valore particolare del parametro di controllo “sorgente di inserimento”.

2.2 MODALITÀ DI COMUNICAZIONE DEI DATI DOSIMETRICI

I dati dosimetrici generalmente vengono inviati a ciascun utente entro un mese dall’arrivo dei dosimetri restituiti al servizio. La comunicazione avviene tramite l’invio di tabulati di dose, datati e firmati dal responsabile del Servizio Dosimetrico, dove è indicato, oltre alla data di arrivo dei dosimetri al Servizio, quanto segue:

- codice dell’Ente, es: 8A;
- nominativo dell’Ente, es: ENEA;
- periodo al quale i dati si riferiscono, es: Periodo 5 1 Luglio-15 Agosto 1998.

Segue l’elenco dei dati eventualmente ripartiti in reparti come richiesto dall’Utente. Ciascuna riga dell’elenco si riferisce ad un utilizzatore e nel tabulato sono indicati:

- codice persona, es: 302;
- nome utilizzatore, es: Rossi Mario;
- parte controllata, es: petto;
- codice dosimetro, es: 25800867;
- dose espressa in mSv: 0.05
- incertezza %; es: 30
- eventuali note, es: Comunicazione urgente, Ns lettera del..., Dosimetro danneggiato: non valutabile, Pervenuto manomesso etc.

La comunicazione può avvenire anche in tempi differenti (es. comunicazioni urgenti) e con modalità differenti (es. copia via fax) secondo quanto richiesto dall’utente.

In particolare, oltre al tabulato di dose stampato su carta è possibile inviare i dati su dischetto. Il contenuto dei tabulati è registrato su un file formato "XBASE" (.dbf) leggibile da *tutti i* linguaggi Xbase compatibili o programmi di fogli elettronici (es. Lotus123, Excel). Il file è costituito da una serie di record relativi a ciascuna riga del tabulato di dose sopra descritto, il cui formato è indicato in un file di testo di accompagnamento contenuto anch'esso nel dischetto inviato.

CAPITOLO 3. MODALITA' OPERATIVE DEL SERVIZIO DOSIMETRICO

3.1 NOTE ORGANIZZATIVE

L'uso dei dosimetri personali da parte degli utenti è regolato dalle seguenti modalità:

1. La ditta o Ente deve nominare un responsabile con il quale il servizio corrisponde. Per motivi legali, il responsabile per la consegna dei dosimetri e il destinatario dei tabulati di dose devono essere la stessa persona.
2. L'indirizzo di consegna dei dosimetri è unico. Tuttavia esso può differire dal recapito ai fini amministrativi.
3. A richiesta dell'Utente, è possibile suddividere in reparti l'elenco dei dosimetri forniti. In nessun caso i dosimetri di un reparto possono essere consegnati a indirizzi differenti. E' l'Utente che provvede a smistare i dosimetri ai vari reparti.
4. La spedizione dei dosimetri avviene secondo le modalità scelte dall'Utente (posta normale, posta celere, raccomandata, corriere, etc.). L'ENEA si prende a carico la sola consegna dei dosimetri all'Utente e non il ritiro di essi.
5. Per tutto il personale sottoposto a controllo dosimetrico devono essere specificati (compilando moduli specifici) luogo e data di nascita, sesso, reparto, mansione, tipo dosimetro richiesto, parte del corpo controllata, tipo di supporto (solo per dosimetri per estremità).
6. Ogni qualvolta l'Utente deve apportare variazioni al numero o al tipo di dosimetri deve comunicare tali variazioni al Servizio Dosimetrico, compilando debitamente l'apposito modulo. E' garantito l'inserimento delle variazioni per i dosimetri richieste dall'Utente se il modulo debitamente compilato perviene al Servizio Dosimetrico entro 20 giorni dall'inizio del periodo di utilizzo. Se il modulo perviene oltre tale scadenza, la variazione viene registrata a decorrere dal periodo successivo.
7. Nel caso vi siano variazioni inerenti all'ente utente (es. cambio nominativo, ragione sociale, nominativo responsabile etc.) è necessario comunicarle compilando l'apposito modulo.
8. Tutte le variazioni richieste devono essere inoltrate mediante comunicazione scritta, anche via fax.
9. La periodicità di utilizzo dei dosimetri è di 45 giorni per i dosimetri per corpo intero per $X+\gamma$ e $nt+\gamma$ e di 90 giorni per i dosimetri per estremità e dosimetri personali per neutroni veloci. I periodi di utilizzo dei dosimetri sono specificati nell'allegato 1. Si fa inoltre presente che le date relative ai periodi di utilizzo sono inderogabili per ovvie esigenze di servizio. E' possibile, tuttavia, solo in casi eccezionali ricevere dosimetri "fuori partita" al di fuori delle normali spedizioni.
10. Gli utenti al termine di ogni periodo di utilizzo devono raccogliere i dosimetri in uso e sostituirli con i dosimetri del periodo successivo.
11. Il Servizio si impegna a far pervenire i dosimetri di ogni periodo una settimana prima della data di inizio del periodo di utilizzo. L'Utente deve invece far pervenire i dosimetri raccolti del periodo terminato entro 15 giorni dal termine del periodo di utilizzo.
12. I dosimetri riconsegnati in ritardo (comunque di non oltre 3 mesi) vengono letti con i turni successivi.
13. I dosimetri di cui si richiede una lettura urgente vengono letti immediatamente al loro arrivo al Servizio ed il valore di dose comunicato entro poche ore via fax o via telefono (secondo richiesta) senza alcun aggravio economico per l'Utente.

14. Il Servizio Dosimetrico si impegna a spedire i tabulati di dose entro 1 mese dall'arrivo dei dosimetri al Servizio. E' possibile comunque, compatibilmente con i tempi tecnici di lettura, accordarsi su comunicazioni più celeri dei dati o di alcuni di essi.
15. Su richiesta, è possibile ricevere i dati dosimetrici su floppy disk contenuti in un file **.dbf** compatibile con i comuni software di database. Il floppy disk contiene anche un file di testo che descrive brevemente il formato del record del file.
16. Ogni dosimetro per corpo intero è contrassegnato con il nome dell'utilizzatore ed una sigla di codifica (vedi fig.5).
17. I dosimetri per estremità sono contrassegnati dal solo codice a barre. L'abbinamento fra codice a barre e utilizzatore è riportato nella lista di spedizione.
18. E' possibile ricevere dosimetri di scorta, anch'essi univocamente identificati, e contrassegnati dalla dicitura "Anonimo XX".
19. Al fine di evitare confusioni tra i dosimetri della partita in arrivo e di quelli in partenza presso l'Utente, i dosimetri vengono contraddistinti, oltre che da una diversa numerazione, dal colore (verde o rosso) del logo Enea leggibile sulla busta di plastica protettiva di ogni singolo dosimetro e dal colore dei dosimetri (grigio chiaro/scuro alternativamente).
20. Non vi è, invece, nessuna distinzione di colore tra dosimetri per estremità appartenenti a periodi di controllo differenti.
21. Ogni spedizione di dosimetri è accompagnata da un dosimetro di controllo che deve essere conservato in un ambiente ad umidità e temperatura corrispondenti ai valori normali di impiego e lontano da sorgenti di calore e di radiazioni. Tale dosimetro di controllo serve a "testimoniare" la dose eventualmente assorbita durante il trasporto. Esso deve essere riconsegnato con la partita di appartenenza.
22. Ad ogni spedizione è allegata la lista di spedizione in cui sono riportati nell'intestazione: codice dell'ente (Utente), nominativo dell'Ente, periodo di utilizzo. Segue l'elenco della spedizione, suddiviso per tipo di dosimetro, costituito da:
 - codice persona, assegnato in modo permanente al momento dell'inserimento del nominativo nell'archivio del servizio. Esso serve ad identificare univocamente tale persona e deve essere citato per qualunque variazione ad essa relativa;
 - nome e cognome dell'utilizzatore (o denominazione del locale per i dosimetri ambientali)
 - parte controllata (petto, mano, ambiente)
 - numero del dosimetro
 - codice a barre (utile per l'assegnazione dei dosimetri per estremità non contrassegnati dal nominativo)
23. L'ultima pagina della lista di spedizione su cui è riportata la quantità e il tipo dei dosimetri inviati, costituisce la certificazione di fornitura valida ai fini della fatturazione.
24. I tabulati di dose sono nominativi e rispecchiano il listato di spedizione dei dosimetri. Gli stessi dati vengono conservati nell'archivio del servizio dosimetrico per un periodo di tempo di 10 anni.
25. Si evidenzia che le dosi comunicate (per radiazione fotonica) corrispondono al valore di dose misurata sottratta del valore di dose ambientale (fissato in 0.1 mGy/45gg, valore stimato come fondo ambientale medio nazionale) corrispondente al periodo di tempo intercorso fra il confezionamento e la lettura del dosimetro stesso.

3.2 MODALITA' DI COMMISSIONE E COSTI

Per richiedere di usufruire delle prestazioni del Servizio Dosimetrico dell'Enea, l'Utente deve attenersi a quanto segue:

1. Ogni ordine deve essere effettuato mediante richiesta scritta.
2. L'Utente al momento della definizione del contratto deve fornire tutti gli estremi amministrativi necessari ai fini della fatturazione, i dati del responsabile per la consegna dei dosimetri, dei tabulati di dose e ogni altra eventuale comunicazione.
3. Le spese di spedizione dei dosimetri dal Servizio Dosimetrico all'Utente sono a carico dell'ENEA. Mentre le spese per la riconsegna dei dosimetri al Servizio sono a carico dell'Utente.
4. Il costo del dosimetro di controllo che accompagna ogni spedizione di dosimetri è a carico dell'Utente.
5. Il costo di ogni dosimetro descritto è specificato nell'allegato 2. Il costo si riferisce al prezzo unitario per il noleggio e la lettura di ogni dosimetro per singolo periodo di utilizzo.
6. I costi indicati nell'allegato sono quelli attuali e sono passibili di variazioni che verranno comunque comunicate per tempo all'Utente.
7. I dosimetri che pervengono oltre 3 mesi dopo la scadenza del periodo di utilizzo risulteranno "non rientrati" e fatturati come tali. Pertanto il prezzo di tali dosimetri corrisponde alla somma del prezzo per noleggio e lettura e del prezzo per perdita del dosimetro.
8. La fatturazione avviene a scadenza semestrale. L'emissione delle fatture si riferisce quindi ai periodi: gennaio-giugno e luglio-dicembre di ogni anno.
9. Le fatture devono essere pagate entro 60 giorni dal ricevimento della fattura.

Tutte le comunicazioni di cui ai paragrafi sopra descritti devono essere inviate a: ENEA AMB/PRO/IRP - Servizio Dosimetrico, via dei Colli n. 16 40136 Bologna (tel. 051 - 6098349, fax. 051 - 6098348).

BIBLIOGRAFIA

- 1) International Commission for Radiation Protection. *Data for Protection Against Ionizing Radiation from External Sources*. ICRP publication 21. Pergamon Press, Oxford (1973).
- 2) International Commission on Radiation Units. *Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources. Part 2*. ICRU Report 43, (1988).
- 3) International Commission on Radiation Units. *Measurement of dose Equivalents Resulting from External Photon and Electron Radiations*. ICRU Report 47, (1992).
- 4) International Commission on Radiation Units. *Quantities and Units in Radition Protection Dosimetry*. ICRU Report 51, (1993).
- 5) Gualdrini G., Fantuzzi E., Monteventi F., Morelli B., Sermenghi I., Uleri G. *Definizione dei campi di radiazione e delle procedure operative per la calibrazione di dosimetri personali per fotoni in ottemperanza alle raccomandazioni ICRU*. XXX Convegno Nazionale AIRP, L'Aquila 24-26 settembre 1997
- 6) Fantuzzi E., Monteventi F., De Maio U., Poli R., Uleri G. *Progettazione di un dosimetro personale a termoluminescenza con rivelatori di LiF(Mg,Cu,P) per radiazione fotonica*. ENEA, RT/AMB/94/07, (1994).
- 7) Fantuzzi E., Monteventi F., Argazzi E., Uleri G., Baldassarre G., De Maio U. *Nuovi dosimetri personali a TL basati su GR-200 del Servizio di Dosimetria Personale dell'Enea di Bologna*. Atti XXIX Congresso Nazionale AIRP, Trieste 27-30 Settembre 1995.
- 8) Fantuzzi E., Monteventi F., De Maio U., Poli R. *Rivelatori a termoluminescenza di LiF(Mg,Cu,P) sottoposti a prove di irraggiamento e lettura simulanti la routine di un servizio di dosimetria personale*. ENEA, RT/AMB/93/16, (1993).
- 9) Ente Nazionale Italiano di Unificazione - Commissione Energia Nucleare UNICEN. *Dosimetri a termoluminescenza per dosimetria personale ed ambientale- Caratteristiche e metodi di prova*. UNI9881 (1991)
- 10) Argazzi E., Baldassarre G., De Maio U., Fantuzzi E., Monteventi F., Uleri G. *Determinazione della sensibilità intrinseca di un numero elevato di dosimetri personali di LiF(Mg,Cu,P)*. ENEA, RT/AMB/96/6, (1996)
- 11) International Organisation for Standardisation. *X and gamma reference radiations for calibrating doseimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy*. ISO 4037, (1996).
- 12) Hirning R. *Detection and Determination Limits for Thermoluminescence Dosimetry*. Health Phys. **62**(3), p. 223-227, (1992).
- 13) Christensen P., Griffith R.V. *Required Accuracy and Dose Thresholds in Individual Monitoring*. Radiat. Prot. Dosim. **54** (3-4), p. 279-285, (1994).
- 14) Fantuzzi E. *Confronto della soglia di rivelazione di sistemi dosimetrici in vista della nuova normativa*. TLD User's Meeting, Ortisei - 30 Marzo 1996.
- 15) Fantuzzi E., Morelli, B. *Tre anni di esperienza nella routine di un Servizio di dosimetria Individuale con dosimetri basati sul LiF(Mg,Cu,P)*. Radioprotección - N° Extraordinario - Mayo 1998 - Atti del IV Congreso de Protección Radiológica de Países Europeós del Mediterráneo Occidental, Barcelona, 27-29 de Mayo, 1998.
- 16) Christensen P. *Study of LiF:Mg,Cu,P TL Detectors for Individual Monitoring for Weakly Penetrating Radiations*. Radiat. Prot. Dosim. **47** (1-4), p. 425-430, (1993).
- 17) Fantuzzi E., Gualdrini G., Monteventi F., Morelli B., Vilela E.A *Tl Dosimeter for Mixed Thermal Neutron and Gamma Fields Based On GR-200 And GR-207 Detectors*. Radiat. Prot. Dosim. **83-84**, (1-4), in stampa.

- 18) Klemic G., Azziz N., Marino S.A. *The Neutron Response of $Al_2O_3:C$, $LiF(Mg,Cu,P)$ and $LiF(Mg,Ti)$ TLDs*. Radiat. Prot. Dosim. **65**(1-4), p. 221-226 (1996).
- 19) Klemic G., Shobe J., Miller K., Shebell P., Carolan P.T., Holeman G., Kahnhauser H., Sengupta S., Azziz N. *State of the Art of Environmental Dosimetry: results from the 11th International Intercomparison of Environmental Dosemeters*. Radiat. Prot. Dosim. **83-84**, (1-4), in stampa.
- 20) Fantuzzi E., Gualdrini G., Morelli B., Monteventi F. *Monte Carlo computed parameters for the design of personal dosemeters*. Austrian-Italian-Hungarian Radiation Protection Symposium, Obergurgl-Tyrol, Austria 28-30 Aprile 1993
- 21) Fantuzzi E., Monteventi F., Sermenghi I., Uleri G. *Characterisation Of A Personal Tl Photon Dosemeter Based on Two $LiF(Mg,Cu,P)$ Detectors in Terms of $H_p(0.07,A)$ And $H_p(10,A)$* . Radiat. Prot. Dosim. **83-84**, (1-4), in stampa.
- 22) Vilela E., Morelli B., Gualdrini G., Monteventi F., Fantuzzi E. *Assessment of a thermal neutron facility for calibration of dosimetric instruments*. Proc. 2nd Regional Mediterranean Congress on Radiation Protection. Tel Aviv - Israel, November 16-20, 1997.
- 23) Vilela E., Morelli B., Gualdrini G., Burn K.W., Monteventi, F. *Experimental and Monte Carlo Evaluations of the Dosimetric Characteristics of a Thermal Neutron Calibration Assembly*. Radiat. Prot. Dosim. **83-84**, (1-4), in stampa.
- 24) International Organisation for Standardisation. *Reference neutron radiations. Part1: Characteristics and Methods of Production*. ISO/CD 8529-1 (Draft December 1998).
- 25) International Commission for Radiation Protection. *Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation*. ICRP publication 74. Pergamon Press, Oxford (1997).
- 26) Morelli B., Vilela E., Fantuzzi E. *Studio dei parametri di attacco chimico di rivelatori a tracce di CR-39 per impieghi in Dosimetria Neutronica Personale*. ENEA, RT/AMB/98/...(in stampa).
- 27) Morelli B., Vilela E., Fantuzzi E. *Ottimizzazione delle procedure di attacco chimico e valutazione delle prestazioni dosimetriche di due tipi di materiali di CR-39*. Radioprotección - N° Extraordinario - Mayo 1998 - Atti del IV Congreso de Protección Radiológica de Países Europeos del Mediterráneo Occidental, Barcelona, 27-29 de Mayo, 1998.
- 28) Morelli B., Vilela E., Fantuzzi E. *Dosimetric Performance Of The Fast Neutron Personal Dosemeter of the Enea Personal Dosimetry Service*. Radiat. Prot. Dosim. **83-84**, (1-4), in stampa.
- 29) *Neutron Dosimetry* - Proceedings of the Eight Symposium, Paris, November 13-17 1995, Radiat. Prot. Dosim., **70**, (1-4), (1997).
- 30) Fantuzzi E., Gualdrini G., Monteventi F., Morelli B., Vilela E., Falangi G. *Fast Neutron Dosimetry with CR-39*. Istituto Nazionale di Fisica Nucleare - Laboratori Nazionali di Legnaro Annual Report 1997 - LnL - INFN (Rep) - 125/98, (1998).
- 31) Martone M., Angelone M., Pillon M. *The 14MeV Frascati Neutron Generator (FNG)*. ENEA, RT/ERG/FUS/93/65, (1993)
- 32) Angelone M., Pillon M., Batistoni P., Martini M., Martone M. Rado V. *Absolute experimental and numerical calibration of the 14 MeV neutron source at the Frascati neutron generator*. Rev. Sci. Instrum., **67**, (6), (1996)
- 33) Intercast Europe S.p.a., via G. Natta n.10/A, Parma - Italy
- 34) International Organisation for Standardisation. *Reference neutron radiations. Part3: Calibration of area and personal dosimeters and determination of their response as a function of neutron energy and angle of incidence*. ISO/FDIS 8529-3

- 35) International Organisation for Standardisation. *Reference beta radiations for calibrating dosimeters and dose-rate meters and for determining their response as a function of beta-radiation energy*. ISO 6980, (1996).
- 36) International Organisation for Standardisation. *X and gamma reference radiations for calibrating doseimeters and dose-rate meters and for determining their response as a function of photon energy. Part 3: Area and personal doseimeters*. ISO 4037-3, (1996).
- 37) Civolani O., Fassò A., Lembo L., Tagliati S.. *Manuale per la Dosimetria di Criticità*. Comitato Nazionale Energia Nucleare. Serie Manuali. Roma (1975).
- 38) Médioni R., Delafield H.J. *Criticality Accident Dosimetry: An International Intercomparison at the Silene Reactor*. Radiat. Prot. Dosim., **70**, (1-4), p.445-454, (1997).
- 39) Bricka M., Nguyen Van Dat, Portheos L. *Le Spectromètre neutrons à activation SNAC. Principe, Méthode et Utilisation*. CEA-R-4226, (1971).

**PERIODICITA' DI FORNITURA E UTILIZZO DEI DOSIMETRI DEL
SERVIZIO DOSIMETRICO DELL'ENEA**

DOSIMETRI PER CORPO INTERO PER X+ γ e NEUTRONI TERMICI+ γ

PERIODO	DAL	AL
1	1 gennaio	15 febbraio
2	16 febbraio	31 marzo
3	1 aprile	15 maggio
4	16 maggio	30 giugno
5	1 luglio	15 agosto
6	16 agosto	30 settembre
7	1 ottobre	15 novembre
8	16 novembre	31 dicembre

DOSIMETRI PER ESTREMITA' E DOSIMETRI PER NEUTRONI VELOCI

PERIODO	DAL	AL
1 - 2	1 gennaio	31 marzo
3 - 4	1 aprile	30 giugno
5 - 6	1 luglio	30 settembre
7 - 8	1 ottobre	31 dicembre

DOSIMETRI DI CRITICITA'

PERIODO	DAL	AL
1 (annuali)	1 aprile	31 marzo

TARIFFE PER LETTURA E NOLEGGIO DOSIMETRI DEL SERVIZIO DOSIMETRICO DELL'ENEA

Sono riportate le tariffe per la lettura e noleggio dei dosimetri forniti dal Servizio Dosimetrico dell'ENEA. Sono state altresì stimati i valori attuali dei dosimetri per l'addebitamento in caso di smarrimento. Le tariffe in vigore sono state stabilite con la delibera D.G. ENEA n.14/94. Il costo in lire si riferisce a un dosimetro per un periodo di utilizzo.

TIPO DOSIMETRO	LETTURA E NOLEGGIO	PERDITA DOSIMETRO ⁴
Corpo intero per fotoni (X+ γ)	8000	30000
Corpo intero per neutroni termici + γ	10000	80000
Corpo intero per neutroni veloci	11000	10000
Dosimetro per estremità	12000	20000
Personale di criticità	58000	100000
Ambientale di criticità	80000	150000

⁴Il dosimetro, come sempre, è considerato smarrito quando non perviene al Servizio di Dosimetria entro 3 mesi dalla scadenza del periodo di utilizzo.