

**Università degli Studi di Roma  
“La Sapienza”**



**Dottorato di Ricerca in  
“Ingegneria Chimica dell’Ambiente e della Sicurezza”  
XII° ciclo**

**Misura della concentrazione di radon  
in acqua, con particolare riferimento ai  
sistemi di monitoraggio ‘in continuo’**

**Dottorando Ing. Gianfranco Galli  
Matricola I96018**

**Anno accademico 1998/1999**

# Sommario

1. Il radon, dosimetria e correlazione con i fenomeni sismici .....	1-1
1.1. Caratteristiche del radon .....	1-1
1.2. Dosimetria da radon in acqua.....	1-4
1.3. Il radon nelle formazioni geologiche .....	1-5
1.4. Meccanismi di trasferimento del radon dai solidi ai fluidi .....	1-7
1.4.1. L'effetto "alpha-recoil" .....	1-7
1.4.2. Diffusione nel reticolo cristallino.....	1-9
1.5. Meccanismi di migrazione e trasporto del radon .....	1-10
1.5.1. Migrazione per diffusione .....	1-11
1.5.2. Migrazione per convezione.....	1-11
1.5.3. Migrazione per trasporto di gas (gas carrier) .....	1-12
1.6. Il radon nelle falde acquifere .....	1-13
1.6.1. Falde acquifere da rocce cristalline.....	1-15
1.6.2. Falde acquifere da rocce sedimentarie .....	1-16
1.7. Il radon come precursore di eventi sismici.....	1-17
1.7.1. Principali caratteristiche delle anomalie di radon .....	1-17
1.7.2. Le anomalie di radon: breve sintesi cronologica.....	1-18
2. Sistema $\gamma$ per la misura della concentrazione di radon in un campione d'acqua .....	2-1
2.1. Breve descrizione del sistema .....	2-1
2.2. Scelta delle dimensioni dello scintillatore.....	2-1
2.3. Sistema per l'arricchimento di radon in acqua .....	2-6
2.4. Campionatore del volume di acqua da inviare al beaker Marinelli .....	2-11
2.4.1. Motivi per l'impiego del campionatore.....	2-11
2.4.2. Descrizione del campionatore.....	2-11
2.4.3. Scelta dei microinterruttori .....	2-12
2.5. Componentistica impiegata .....	2-13
2.6. Determinazione del fondo .....	2-15
2.7. Calibrazione del sistema $\gamma$ .....	2-17
2.7.1. Valutazione dell'efficienza, della MDA e del rapporto segnale/rumore .....	2-17
2.7.2. Scelta del tempo di acquisizione e della ROI.....	2-19
2.8. Calcolo della concentrazione di radon in acqua.....	2-21
2.9. Stabilità nel tempo della risposta del sistema.....	2-21
2.10. Scelta del sito ove ubicare il sistema di monitoraggio .....	2-25
3. Misura "in continuo" della concentrazione di radon in acqua mediante cella a scintillazione o spettroscopia $\gamma$ .....	3-1
3.1. Cenni sulle tecniche di rivelazione adottate .....	3-1
3.2. Cella a scintillazione .....	3-2
3.3. Dispositivo per il trasferimento nel volume di misura del radon contenuto in un campione di acqua .....	3-4
3.3.1. Determinazione delle perdite di carico del sistema $\alpha$ .....	3-6
3.4. Strumentazione elettronica per l'analisi del segnale .....	3-8
3.4.1. Il partitore di tensione .....	3-9
3.5. Monitoraggio della concentrazione di radon in acqua mediante tecniche $\alpha$ e $\gamma$ .....	3-12
3.5.1. Definizione dei tempi del ciclo .....	3-16
3.5.2. Strumentazione elettrica impiegata .....	3-18
3.5.3. Strumentazione elettronica impiegata .....	3-22
3.6. Valutazione del fondo .....	3-24
3.7. Procedura di calibrazione.....	3-26
3.8. Valutazione dell'efficacia del ricambio di aria nel cilindro in PVC .....	3-30
3.9. Andamento del tipico ciclo di misura .....	3-33
3.10. Osservazioni sul sistema $\alpha$ .....	3-34
4. Misura "in continuo" della concentrazione di radon in acqua mediante cella a scintillazione. Sistema definitivo.....	4-1
4.1. Principali modifiche apportate .....	4-1

4.2. Il sistema di monitoraggio $\alpha$ .....	4-5
4.3. Strumentazione impiegata .....	4-9
4.3.1 Strumentazione elettrica impiegata .....	4-9
4.3.2. Strumentazione elettronica impiegata .....	4-10
4.4. Valutazione del fondo .....	4-11
4.5. Esito dei test di laboratorio sul sistema $\alpha$ .....	4-12
5. Collaudo del sistema per la misura "in continuo" della concentrazione di radon in acqua mediante spettrometria $\gamma$ presso il centro ENEA di Frascati.....	5-1
5.1. Generalità.....	5-1
5.2. Strumentazione impiegata .....	5-4
5.2.1 Strumentazione elettrica impiegata .....	5-4
5.2.2. Strumentazione elettronica impiegata .....	5-4
5.3. Valutazione del fondo .....	5-5
5.4. Calibrazione del sistema $\gamma$ .....	5-6
5.5. Risultati ottenuti.....	5-8
5.6. Stabilità della risposta.....	5-9
6. Collaudo dei sistemi per la misura "in continuo" della concentrazione di radon in acqua mediante spettrometria $\gamma$ e cella a scintillazione presso il centro ENEA di Frascati.....	6-1
6.1. Generalità.....	6-1
6.2. Strumentazione impiegata .....	6-6
6.2.1 Strumentazione elettrica impiegata .....	6-6
6.2.2. Strumentazione elettronica impiegata .....	6-6
6.3. Valutazione del fondo .....	6-7
6.4. Calibrazione dei sistemi $\alpha$ e $\gamma$ .....	6-8
6.5. Considerazioni sui valori di MDA per i sistemi $\alpha$ e $\gamma$ installati in una stazione di monitoraggio .....	6-11
6.6. Andamento della concentrazione di radon nell'acqua del pozzo di Frascati.....	6-12
6.7. Stabilità della risposta.....	6-31
6.8. Tecnica di analisi mediante albero dei guasti applicata ai sistemi di monitoraggio $\alpha$ e $\gamma$ .....	6-33
6.8.1. Descrizione della tecnica .....	6-33
6.8.2. Simboli impiegati per la costruzione dell'albero degli guasti .....	6-34
6.8.3. Schema idraulico di riferimento per la costruzione degli alberi di guasto .....	6-35
6.8.4. Studio del sistema di monitoraggio $\gamma$ .....	6-35
6.8.5. Studio del sistema di monitoraggio $\alpha$ .....	6-38
6.8.6. Frequenze di accadimento degli eventi base .....	6-42
6.8.7. Valutazione delle frequenze di accadimento dei Top Events.....	6-44
6.8.8. Considerazioni a conclusione dell'analisi di sicurezza .....	6-46
7. Sovrapposizione dei dati sismici.....	7-1
7.1. Confronto fra la concentrazione di radon in acqua e la magnitudo .....	7-1

Conclusioni

Bibliografia

#### **Allegato A**

Esposizione alla radioattività ambientale

#### **Allegato B**

Radon grab sampling in water by means of radon transfer in activated charcoal collectors

#### **Allegato C**

Continuous measurement system of radon concentration in water by gamma radiation detection emitted by  $^{214}\text{Bi}$  and  $^{214}\text{Pb}$  decay

#### **Allegato D**

Ripartizione del radon in un contenitore in cui siano presenti le fasi liquida e aeriforme

**Allegato E**

Confronto tra tre metodologie di misura della concentrazione di radon in acqua

**Allegato F**

Temporized measurement of groundwater radon concentration by alpha-scintillation counting, for continuous monitoring addressed to natural hazards surveillance

**Allegato G**

Alcune considerazioni sull'impiego di collettori a carboni attivi per la misura della concentrazione di  $^{222}\text{Rn}$  in aria indoor

**Allegato H**

Evoluzione di una miscela costituita da  $^{222}\text{Rn}$  e dai suoi prodotti di decadimento

**Allegato I**

Manuale del software di gestione della scheda multicanale EG&G ORTEC MCB Type 916-002

## Introduzione

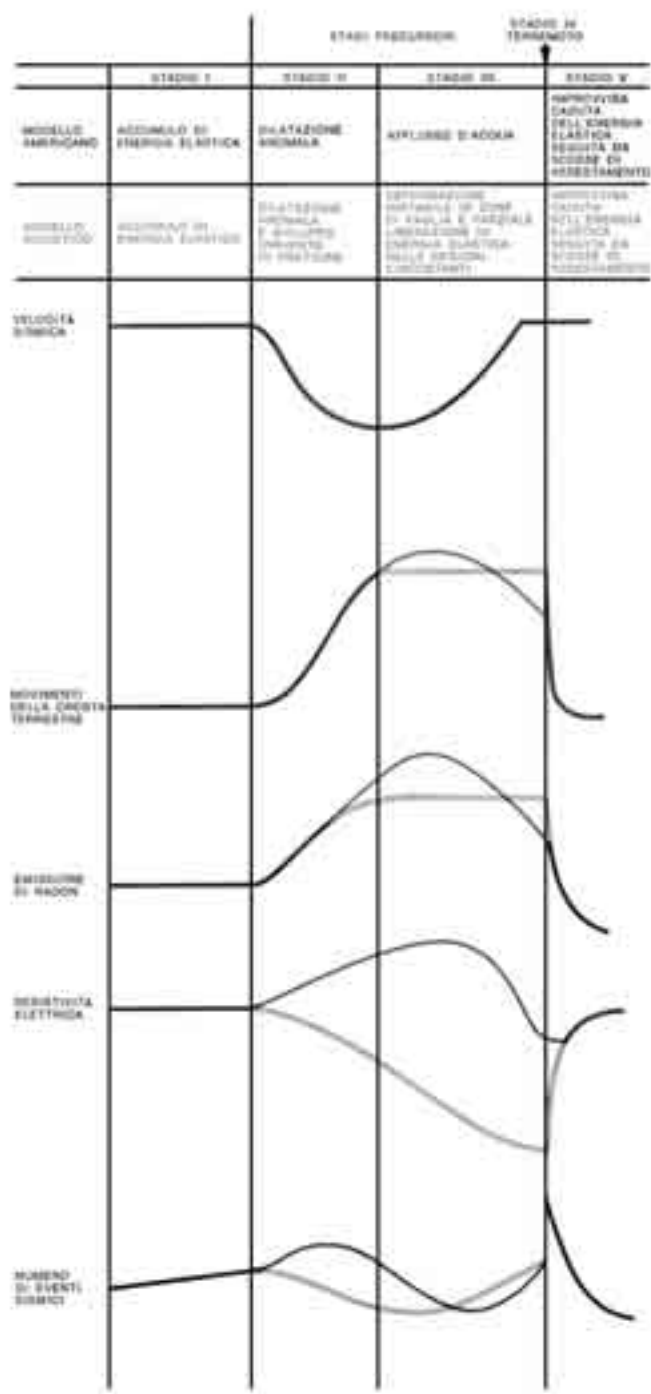
L'obiettivo che ci si è prefissi con l'attività triennale di ricerca è stato quello di progettare e realizzare strumenti atti alla misura "in continuo" della concentrazione di radon in acqua di falda da installare presso stazioni di monitoraggio dotate di sensori che, rivelando variazioni spesso rilevanti di alcuni parametri caratteristici quali l'innalzamento della crosta terrestre, la resistività elettrica delle rocce, l'abbondanza dei vari elementi nel sottosuolo, la frequenza dei piccoli eventi sismici, la velocità di propagazione longitudinale e trasversale delle onde elastiche e, per quanto riguarda le acque di falda, variazioni ad esempio di conducibilità, temperatura e pH, possono contribuire a prevedere il verificarsi di fenomeni sismici e vulcanici. Va detto che ben difficilmente possono fondarsi previsioni attendibili sulla base di variazioni delle singole grandezze, pertanto si sottolinea l'importanza dell'analisi combinata delle variazioni di un insieme di grandezze (approccio multiparametrico).

Secondo la teoria della tettonica a zolle l'involucro roccioso più esterno della terra, la litosfera, è costituito da zolle rigide in moto relativo tra loro sopra uno strato del mantello parzialmente fuso, l'astenosfera. La litosfera viene continuamente generata lungo le dorsali ove si verifica la risalita e il successivo raffreddamento del magma, mentre scompare quando una zolla, a contatto con quella attigua, va in subduzione : ossia viene spinta verso l'interno del mantello terrestre. Lungo tale moto la litosfera si riscalda per effetto del gradiente termico crescente con la profondità, per effetto della compressione a cui è sottoposta e quindi per effetto degli attriti : a causa degli attriti può verificarsi il blocco del moto relativo tra i blocchi di roccia, ne consegue un continuo accumulo di energia elastica fintanto che l'attrito che blocca la faglia viene vinto in qualche punto. I blocchi di roccia scivolano improvvisamente l'uno contro l'altro e quel punto diviene il fuoco del terremoto ; l'energia elastica che si era accumulata viene liberata improvvisamente sotto forma di onde sismiche.

Il volume di roccia in cui si è avuta la rottura viene denominato *fuoco* che, per semplicità, si assimila ad un punto chiamato *ipocentro*. La proiezione verticale dell'ipocentro sulla superficie terrestre prende il nome di *epicentro*, che coincide con il luogo di massima avvertibilità e, talvolta, di effetti, dell'evento.

La maggior parte dei terremoti e delle eruzioni vulcaniche sono associati a questi fenomeni di sprofondamento delle zolle e avvengono soltanto superficialmente dove le

rocce sono abbastanza fredde e rigide da potersi fratturare, con la conseguente mutazione dei parametri sopracitati. Sono stati formulati due modelli per la previsione dei terremoti che differiscono fra di loro in quanto ipotizzano diversi meccanismi attraverso i quali si scatenerrebbe il sisma. Un modello è stato sviluppato negli Stati Uniti, l'altro sostanzialmente negli stati dell'ex Unione Sovietica.



Previsione sulla variazione dei segnali premonitori di eventi sismici secondo il modello americano e secondo quello sovietico.

Nella figura precedente sono rappresentati gli andamenti dei segnali premonitori che dovrebbero verificarsi secondo i due modelli: la linea doppia per il modello americano, la linea piena per quello sovietico. Entrambi prevedono una variazione dell'emissione di radon.

Questa anomalia viene spiegata dal fatto che la composizione dei fluidi che arrivano in superficie dipende dalla composizione dei fluidi che circolano nelle rocce e queste riscaldandosi liberano gas quali elio e radon. Il brusco aumento della concentrazione di radon nelle acque di falda è imputato ad una sua maggiore capacità di migrazione favorita dalle microfessure, createsi con il sisma, che fanno aumentare la superficie di roccia a contatto con i fluidi che la permeano.

In pratica è dal 1966, con la prima evidenza sperimentale di anomalia della concentrazione di radon in acqua nel periodo precedente il terremoto di Tashkent, che il monitoraggio in continuo di tale parametro viene diffusamente impegnato ; per una panoramica su alcuni strumenti realizzati si rimanda all'allegato F.

La ricerca ha portato alla realizzazione di prototipi collaudati inizialmente in laboratorio, ove si è potuto disporre di una riserva limitata (circa 40 l) di acqua arricchita artificialmente in radon<sup>1</sup> ad una concentrazione di oltre 100 Bq/l, e successivamente presso un locale del centro ENEA di Frascati ove si è potuto disporre di un pozzo con acqua a concentrazione di radon piuttosto elevata (oltre 200 Bq/l).

In una prima fase si è realizzato un sistema in cui si misura la radiazione  $\gamma$  emessa dal  $^{214}\text{Pb}$  e dal  $^{214}\text{Bi}$  originati dal decadimento del radon disciolto nell'acqua contenuta in un beaker Marinelli. Per la necessità di raggiungere l'equilibrio radioattivo nell'acqua da misurare, per collaudare il sistema per tempi relativamente prolungati (tipicamente di una settimana) e per l'esiguità della riserva di acqua arricchita disponibile, si è optato per il campionamento del quantitativo di acqua da inviare al beaker Marinelli in ogni ciclo.

Successivamente si è affiancato un secondo sistema dotato di cella a scintillazione che rivela essenzialmente i decadimenti a del  $^{218}\text{Po}$  e del  $^{214}\text{Po}$  ; si è collaudata l'elettronica e l'idraulica nella configurazione pressoché definitiva, stante comunque il limite imposto dal quantitativo di acqua arricchita disponibile.

---

<sup>1</sup> Il basso contenuto in radon dell'acqua fornita dalla rete idrica (circa  $5 \div 10$  Bq/l) non avrebbe permesso di collaudare il sistema  $\gamma$  in condizioni di buona statistica, essendo dello stesso ordine di grandezza della sensibilità della tecnica di misura adottata.

Entrambi i sistemi sono stati installati presso un locale del centro ENEA di Frascati ove hanno funzionato per oltre un anno, permettendo di acquisire una notevole esperienza di esercizio che ha consentito di individuare alcuni componenti critici sotto l'aspetto affidabilistico ; quindi sono stati studiati interventi volti a migliorare il funzionamento e la disponibilità dei due sistemi.

*Si ringrazia l'ENEA, Istituto per la Radioprotezione - Laboratorio di Frascati per la collaborazione e la disponibilità dimostrata nell'aver messo a disposizione il locale in cui sono stati installati i sistemi di monitoraggio.*

*Si ringrazia l'Istituto Nazionale di Geofisica per aver collaborato fornendo i dati sismici relativi alla zona dei Colli Albani.*

*Ringrazio il Prof. Carlo Mancini per il costante ed indispensabile sostegno ricevuto durante il triennio di ricerca.*



# 1. Il radon, dosimetria e correlazione con i fenomeni sismici

## 1.1. Caratteristiche del radon

Il radon, gas nobile, può essere emanato dai materiali ove è stato generato e diffondere nell'atmosfera o solubilizzarsi nelle acque del sottosuolo. Di preminente importanza è l'emanazione di  $^{222}\text{Rn}$ , che ha  $T = 3.823$  giorni. Meno rilevante è l'emanazione di  $^{220}\text{Rn}$  che, in virtù del suo tempo di dimezzamento molto più breve ( $T = 55$  s), può decadere con maggiore probabilità nei prodotti solidi suoi discendenti e non raggiungere l'atmosfera. Trascurabile è l'emanazione di  $^{219}\text{Rn}$  sia per il breve tempo di dimezzamento ( $T = 4.0$  s) che per la bassa frazione di  $^{235}\text{U}$  presente nell'uranio naturale (0.00725).

Sia il  $^{222}\text{Rn}$  che il  $^{220}\text{Rn}$  danno contributi alla dose equivalente; l'UNSCEAR 93 valuta i seguenti valori medi della dose equivalente [1] :

per il  $^{222}\text{Rn}$  :  $1.2 \text{ mSv y}^{-1}$

per il  $^{220}\text{Rn}$  :  $0.07 \text{ mSv y}^{-1}$

Vista la netta prevalenza del contributo del  $^{222}\text{Rn}$  in genere, con il termine di radon, ci si riferisce al  $^{222}\text{Rn}$ .

Il radon emanato dalla superficie terrestre in aria libera è rapidamente disperso e diluito da turbolenze e moti convettivi. Concentrazioni significative possono essere riscontrate se il Rn viene rilasciato in ambienti chiusi, come miniere sotterranee ed abitazioni. In tali ambienti la concentrazione in aria di Rn è inversamente proporzionale al rateo di ventilazione. Nelle abitazioni le maggiori fonti di  $^{222}\text{Rn}$  sono suolo e materiali edilizi ; significativo può essere il rilascio dall'acqua impiegata se ivi è presente a concentrazioni elevate (migliaia di Bq/l). Generalmente predomina il contributo del suolo [2, 3].

Nella figura 1.1 è riportato lo schema di decadimento della famiglia dell' $^{238}\text{U}$ .

Si abbia il generico nuclide di tipo 1 che decade in quello di tipo 2 il quale a sua volta decade in quello di tipo 3 e così via. Se il capostipite (tipo 1) ha una vita media molto maggiore di quelle di ogni altro componente della famiglia, dopo un tempo molto più

lungo (almeno 4 ÷ 5 volte maggiore) dei tempi di dimezzamento  $T_i$  dei figli si raggiunge l'equilibrio secolare : ovvero l'uguaglianza delle attività di tutti i componenti la catena di decadimenti.

In particolare tra il  $^{226}\text{Ra}$  ( $T_{1/2} = 1608$  anni) ed il  $^{222}\text{Rn}$  ( $T_{1/2} = 3.823$  giorni) si stabilisce l'equilibrio secolare, a meno del 3%, dopo circa 20 giorni (fig. 1.2), mentre tra il  $^{222}\text{Rn}$  ed i suoi figli esso viene raggiunto dopo circa 3 ore (fig. 1.3), sempre a meno del 3%.

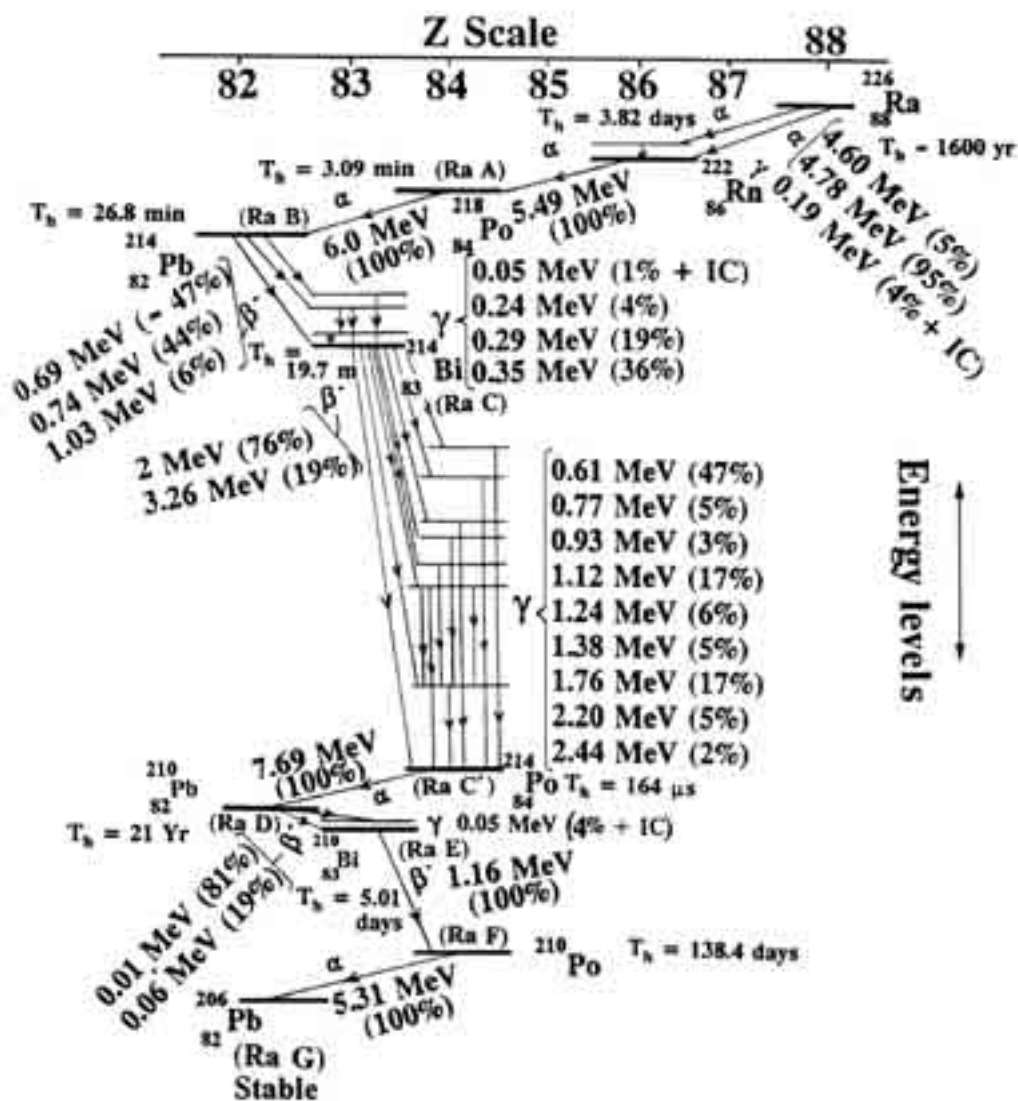
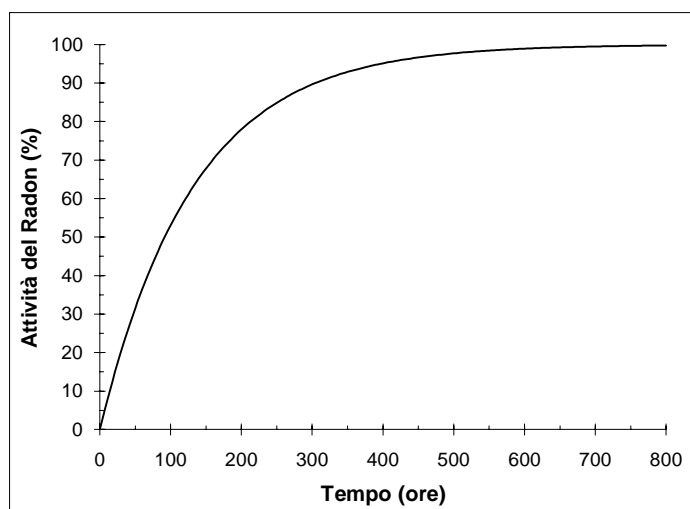
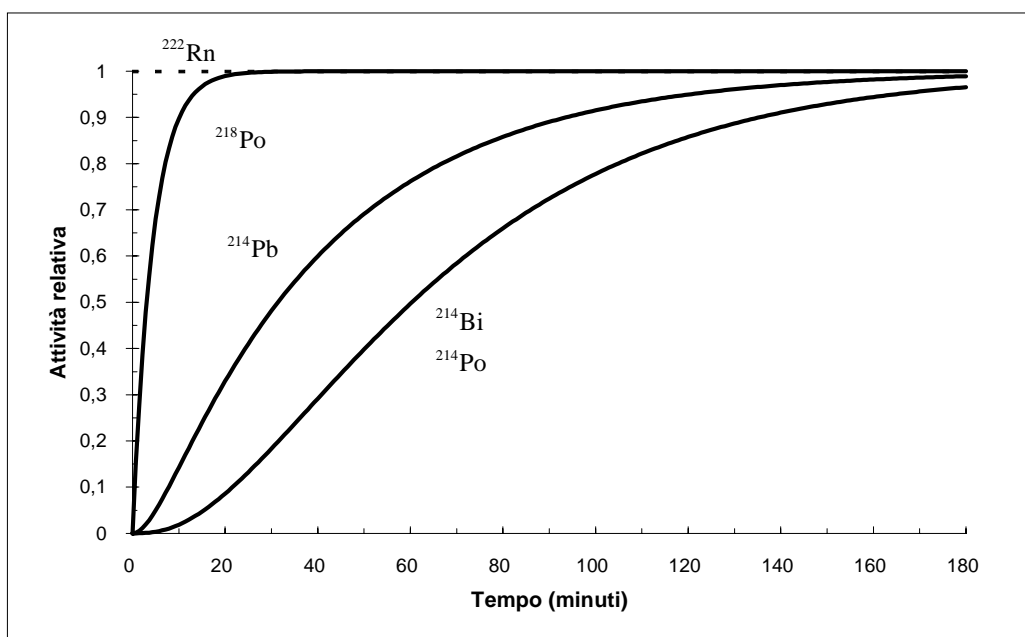


Figura 1.1 - Famiglia radioattiva naturale dell'Uranio ( $^{238}\text{U}$ )



**Figura 1.2** - Formazione di  $^{222}\text{Rn}$  (  $T_{1/2} = 3.823$  giorni ) da  $^{226}\text{Ra}$  (  $T_{1/2} = 1608$  anni )



**Figura 1.3** - Equilibrio secolare del  $^{222}\text{Rn}$  con i figli a breve  $T_{1/2}$

La trattazione analitica che consente di ricavare gli andamenti di attività graficati in figura 1.3 viene riportata nell'allegato H.

Le misure della concentrazione di radon si basano in effetti sulla rivelazione delle radiazioni emesse dai suoi figli a breve tempo di dimezzamento.

## 1.2. Dosimetria da radon in acqua

Il decadimento del radon origina isotopi instabili  $\alpha$  e  $\beta^-$  a breve tempo di dimezzamento che danno irraggiamento interno per inalazione ed ingestione ; degli aspetti dosimetrici relativi all'irraggiamento interno per inalazione si è diffusamente trattato nella pubblicazione riportata nell'allegato A.

Si vuole in questa sede evidenziare il contributo alla dose derivante dal radon contenuto nell'acqua distribuita nelle abitazioni per ingestione e per inalazione della frazione emanata nell'aria.

Poiché è stato valutato che si ha un incremento della concentrazione di radon indoor (in Bq/m<sup>3</sup>) pari alla concentrazione in acqua (in Bq/m<sup>3</sup>) moltiplicata per il fattore  $10^{-4}$  ( $2 \cdot 10^{-4}$  secondo la normativa svedese), tenendo conto del fatto che 50 Bq/m<sup>3</sup> (con una permanenza indoor di 7000 ore/a ed un fattore di equilibrio  $F = 0.4$ ) corrispondono a 1 mSv/a, possiamo concludere che ogni Bq/l di radon in acqua è responsabile di un equivalente di dose efficace di 2  $\mu$ Sv/a (4  $\mu$ Sv/a secondo la normativa svedese) per la parte riguardante il trasferimento del radon nell'aria. Così, ad una concentrazione di 100 Bq/l corrisponde un contributo alla dose pari a 0.2 mSv/a (0.4 mSv/a secondo la normativa svedese).

Nel Report UNSCEAR 1993 [1], relativamente all'ingestione di radon disciolto nell'acqua, si introduce un fattore di conversione pari a  $10^{-8}$  Sv per unità di introduzione (Bq). Pertanto, in funzione del tasso metabolico, si può ottenere la dose efficace impegnata.

All'interno di questo rapporto, vengono messe in evidenza le dosi per i bambini e i neonati per i quali, in considerazione della massa corporea, si assumono fattori di conversione rispettivamente pari a  $2 \cdot 10^{-8}$  Sv·Bq<sup>-1</sup> e  $7 \cdot 10^{-8}$  Sv·Bq<sup>-1</sup>.

Essendo le introduzioni annuali da parte degli adulti, dei bambini e dei neonati rispettivamente pari a circa 50, 75 e 100 l (valori rapportati al tasso metabolico), in riferimento ad una concentrazione di 100 Bq/l si hanno dosi efficaci rispettivamente di 0.05, 0.15 e 0.7 mSv/a.

Assumendo che una popolazione rappresentativa consista del 5% di neonati, 30% di bambini e 65% di adulti, la dose efficace media dovuta ad ingestione da radon è di circa 0.1 mSv/a, valore piccolo se confrontato alle dosi medie da inalazione di radon (1.27 mSv/a).

È evidente dunque che, relativamente alle altre fonti naturali di radiazione, il contributo del radon disciolto nelle acque alla dose diviene importante solo per concentrazioni superiori alle centinaia di Bq/l. Pertanto la valutazione della concentrazione di radon nell'acqua ai fini dosimetrici non necessita di tecniche caratterizzate da elevata sensibilità e precisione.

### **1.3. Il radon nelle formazioni geologiche**

La concentrazione di radon in un materiale, trattandosi di un gas nobile, chimicamente inerte in condizioni normali, è funzione di tre fattori principali:

- Concentrazione e distribuzione dei progenitori  $^{238}\text{U}$  e  $^{226}\text{Ra}$  nel materiale fonte<sup>1</sup>.
- Efficienza dei meccanismi di trasporto dei progenitori del radon nella biosfera [4].
- Vita media del radon rispetto alle costanti di tempo di diffusione.

Per quanto riguarda il primo punto, è stata riscontrata l'assenza di una stretta correlazione tra la concentrazione di radon e quella dei progenitori nello stesso materiale, ad eccezione dei casi estremi; in minerali particolarmente ricchi di uranio e radio è infatti riscontrabile una concentrazione di radon decisamente maggiore di quella misurata in materiali nei quali i progenitori sono quasi del tutto assenti. In tutti i casi intermedi la concentrazione di radon può variare notevolmente in rapporto alla concentrazione dei progenitori. Tale circostanza può essere attribuita all'influenza decisiva dei fenomeni di trasporto, per i quali l'origine del radon rilevato in un materiale deve essere messa in relazione con la concentrazione dei progenitori nel materiale fonte, piuttosto che in quello considerato.

I meccanismi di trasporto assumono un ruolo rilevante nella distribuzione del radon nella biosfera ed è pertanto opportuno analizzarli con un certo dettaglio [5].

Conviene innanzitutto distinguere tra processi in scala macroscopica, mesoscopica e microscopica.

Sono classificati in scala macroscopica quei processi che possono essere definiti in ambito regionale, per aree dell'ordine di alcuni chilometri quadrati. Si tratta

---

<sup>1</sup> Per materiale fonte si intende quel materiale in cui ha avuto luogo la produzione di radon per decadimento dei progenitori, e dal quale, in seguito a fenomeni di diffusione e trasporto, esso può essere trasferito per poi ritrovarsi nel materiale considerato.

fondamentalmente di fenomeni geochimici legati alla migrazione e all'accumulo dei progenitori del radon nelle varie formazioni geologiche. Le prospezioni effettuate nel corso degli anni hanno consentito la costruzione di modelli geochimici piuttosto dettagliati per cui tali meccanismi sono oggi ben noti. Una delle proprietà principali dell'uranio e del torio è la tendenza ad accumularsi nelle fasi più volatili, come nelle rocce fuse o in quelle parzialmente fuse in fase di raffreddamento, nei processi caratteristici della formazione di rocce ignee e metamorfiche.

Si può quindi rilevare un contenuto di uranio maggiore nelle rocce con più basso punto di fusione, come i graniti, piuttosto che in quelle ad elevato punto di fusione, come le dioriti e i basalti. In caso di un aumento di temperatura, quale quello che si ha in corrispondenza dei metamorfismi della crosta terrestre, l'uranio tende a trasferirsi nelle fasi liquide; da tale processo risulta una tendenza globale al trasferimento dal mantello agli strati inferiori della crosta terrestre.

Un secondo meccanismo di mobilitazione, che può classificarsi in scala macroscopica, è quello per cui l'uranio può essere asportato più facilmente dalle acque sotterranee, quando si trova nello stato di ossidazione più alto (+6), stato nel quale può formare composti maggiormente solubili in acqua. Una volta solubilizzato, l'uranio, trasportato dall'acqua, può incontrare condizioni riducenti che ne provocano la repentina precipitazione.

Tra i fenomeni su scala mesoscopica (qualche metro quadrato) si può considerare la ridistribuzione dell'uranio per diffusione, in corrispondenza di fratture o difetti superficiali del terreno<sup>2</sup>; tale fenomeno può essere fortemente attenuato in presenza di depositi glaciali.

Su scala microscopica giocano un ruolo fondamentale i processi di diffusione del radon nelle microporosità delle rocce, la cui entità è funzione della natura stessa della roccia e del contenuto e della distribuzione dell'uranio. Nelle rocce in cui è favorita la precipitazione di ossidi di uranio lungo i bordi dei grani tale diffusione risulta facilitata. Tra queste ultime figurano le rocce ignee ad elevato tenore di silicio, dette rocce acide, come i graniti.

---

<sup>2</sup> Alcuni studi hanno mostrato che la concentrazione di uranio nella frattura è fino a 20 volte più alta di quella delle rocce circostanti.

## 1.4. Meccanismi di trasferimento del radon dai solidi ai fluidi

Il principale meccanismo di trasporto del radon all'interno della crosta terrestre è rappresentato dal suo trasferimento dalle rocce al gas presente nelle porosità intergranulari o, in presenza di umidità, all'acqua.

Essendo un gas nobile, chimicamente inerte in condizioni normali, il radon è in grado di diffondere attraverso le microporosità del terreno e delle rocce; al contrario i suoi figli, molto reattivi, tendono a legarsi alle molecole con le quali entrano in contatto finché non precipitano con queste ultime, anche a distanze notevoli dal punto in cui sono stati prodotti. Nonostante ciò, il radon, a causa del suo tempo di dimezzamento relativamente breve rispetto alle costanti di tempo di diffusione, non può semplicemente diffondere attraverso la struttura cristallina delle rocce per distanze maggiori dell'ordine di pochi nm.

Sono stati proposti diversi modelli per descrivere i meccanismi di mobilitazione del radon; essi sono essenzialmente i seguenti: effetto alpha-recoil e diffusione all'interno del reticolo cristallino.

### 1.4.1. L'effetto “alpha-recoil”

Con particolare riferimento al radon, si definisce *potere emanante* di una roccia il rapporto tra la quantità di  $^{222}\text{Rn}$  che sfugge dalla matrice solida e quella che viene prodotta al suo interno, per decadimento radioattivo, in un volume unitario. Il potere emanante assume ovviamente valori inferiori all'unità; pertanto solo una frazione del radon prodotto all'interno della matrice solida, variabile con la natura della stessa ma indipendente dal contenuto di uranio e radio, può abbandonare la roccia.

La concentrazione di radon nell'acqua presente nelle porosità del terreno, sulla base di questa definizione, risulta essere data dalla relazione che segue :

$$C_{w_{\max}, \text{pore}} = A_{\text{Ra}} \cdot \varepsilon \cdot \delta \cdot \frac{1-p}{p} \quad (1.1)$$

essendo

$C_{W_{max},pore}$	la concentrazione di radon nell'acqua presente nelle porosità del terreno ( $Bq/m^3$ ) ;
$A_{Ra}$	l'attività specifica del $^{226}Ra$ nel terreno ( $Bq/Kg$ ). Si ricorda che 1 ppm di uranio è equivalente a 12.3 $Bq/Kg$ di $^{226}Ra$ assumendo il raggiungimento dell'equilibrio nella serie di decadimenti ;
$\epsilon$	potere emanante ;
$\delta$	densità del terreno ( $Kg/m^3$ ) ;
$p$	porosità del terreno (volume dei pori / volume totale).

Il potere emanante  $\epsilon$  per i terreni vale normalmente  $0.2 \div 0.4$  e può, per certe argille, raggiungere 0.6 ; la porosità  $p$  vale normalmente  $0.25 \div 0.45$ .

Il potere emanante aumenta notevolmente all'aumentare della superficie specifica dei cristalli o dei grani del materiale considerato.

Quando un nucleo di  $^{226}Ra$  decade  $\alpha$ , il nucleo di  $^{222}Rn$  prodotto subisce un rinculo, muovendo nella direzione opposta a quella del nucleo di  $^4He$  con una energia pari a circa 85 keV (98,1% dell'energia globalmente rilasciata in seguito al decadimento). Tale energia è sufficiente perché il nucleo di radon percorra distanze variabili tra 20 e 70 nm nella roccia, circa 100 nm nell'acqua e circa 6300 nm in aria.

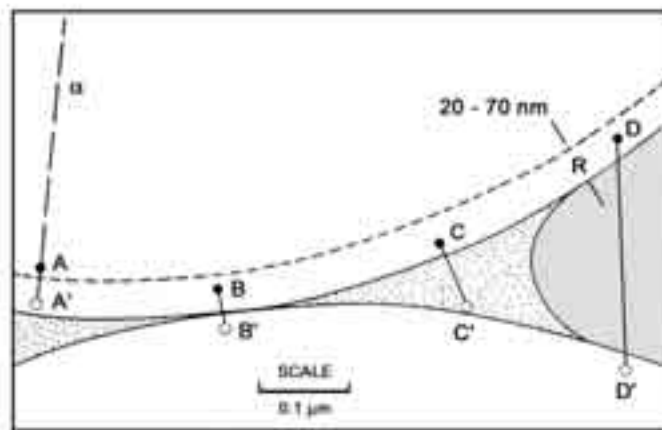
Tanner (1980) ha proposto un modello per spiegare l'effetto di rinculo alfa, secondo il quale solo i nuclei di radio che decadono ad una distanza dalla superficie del grano, minore del range del nucleo di rinculo di radon nel materiale considerato, possono abbandonare il cristallo e subire il trasporto convettivo ad opera dei fluidi (aria o gas) che permeano la roccia. La figura 1.4 mostra le situazioni che possono verificarsi per diverse collocazioni dei nuclei di  $^{226}Ra$  : le zone punteggiate e quelle in grigio rappresentano rispettivamente l'acqua e il gas presenti nelle porosità della roccia.

Come mostra la figura, alcuni di tali nuclei (B e D), pur abbandonando il grano in cui sono prodotti, possono restare intrappolati nella matrice solida dei grani adiacenti, nel caso del nucleo B perché attraversano la superficie di separazione tra i due grani, nel caso del nucleo D perché il gas può non essere sufficiente ad arrestare il nucleo di rinculo prima che questo raggiunga il grano di roccia adiacente.

In base a questo modello appare chiaro l'incremento del potere emanante con l'aumento del rapporto superficie/volume dei grani, aumento che si verifica ad esempio in condizioni di stress tettonici in seguito alla formazione di microfratture.

Quest'ultimo effetto va appunto sotto il nome di effetto da stress.





**Figura 1.4** - Rappresentazione schematica del processo di emanazione del radon per effetto Alpha-recoil.

#### **1.4.2. Diffusione nel reticolo cristallino**

Il radon può diffondere nel reticolo cristallino della roccia; tuttavia, il basso valore del coefficiente di diffusione, unito alla vita media piuttosto breve (5.52 giorni) rispetto alle costanti di tempo del fenomeno, non consentono la percorrenza di una distanza rilevante all'interno della matrice solida.

Il gradiente di concentrazione dovuto alla sola diffusione in un mezzo isotropo si può calcolare con la seguente formula (Andrew et al.) :

$$C(x) = C_0 \cdot e^{\left(-\frac{x}{L}\right)} \quad (1.2)$$

dove

$C(x)$  è la concentrazione di radon ad una distanza  $x$  dall'origine;

$C_o$  è la concentrazione all'origine, cioè nel punto in cui è stato prodotto;

$L$  è la lunghezza di diffusione, data dalla radice quadrata del rapporto tra il coefficiente di diffusione  $D$  e la costante di decadimento  $\lambda$  del  $^{222}\text{Rn}$

Dalla (1.2) risulta che solo il 5% degli atomi di radon è in grado di raggiungere una distanza pari a  $5L$  dal punto in cui è stato prodotto; poichè  $L$  vale 0.7 nm, la capacità di migrazione del radon per sola diffusione è molto limitata e comunque trascurabile rispetto al contributo dovuto all'effetto alpha-recoil.

### 1.5. Meccanismi di migrazione e trasporto del radon

Una volta abbandonata la matrice cristallina delle rocce, il radon può migrare abbastanza agevolmente per distanze che possono raggiungere le migliaia di metri.

Oltre al fenomeno della diffusione del radon attraverso le fessure e gli interstizi delle formazioni geologiche, i suoi figli, chimicamente molto reattivi, si legano con facilità alle molecole del fluido che permea le rocce e da questo possono essere ulteriormente trasportati verso la superficie terrestre.

Va detto tuttavia che il fenomeno è ben più complesso di quanto possa sembrare a prima vista, dipendendo da un gran numero di parametri fisici, chimici e geologici; ad esempio, i parametri pressione e temperatura influiscono in misura notevole sull'entità della diffusione del radon e sulle capacità di trasporto dei fluidi, alterando fortemente il rapporto fra le solubilità dello stesso nei gas e nell'acqua.

Sono state sviluppate negli anni diverse teorie per interpretare le caratteristiche dei processi di trasporto del radon. Nonostante ciò, si è ancora ben lontani dalla piena comprensione del fenomeno e della mutua interazione dei diversi meccanismi che vi prendono parte. È proprio questo aspetto che impedisce per il momento l'esatta interpretazione delle anomalie di radon evidenziabili in prossimità di eventi sismici, con riferimento alla previsione della collocazione temporale e della intensità degli stessi.

Sostanzialmente i possibili meccanismi di trasporto vengono suddivisi in meccanici e convettivi.

### ***1.5.1. Migrazione per diffusione***

La diffusione è il processo attraverso cui una sostanza si muove da una parte all'altra di un sistema in presenza di un gradiente di concentrazione.

I modelli di trasporto per diffusione si basano sulla legge di Fick la cui soluzione, per un elemento radioattivo e nel caso di un mezzo isotropo, è del tipo

$$C(x) = C_o \cdot e^{-\left(\frac{\lambda}{D}\right)^{1/2} \cdot x} \quad (1.3)$$

dove  $x$  è la distanza in cm dalla superficie piana in cui si ha la concentrazione  $C_o$

Per il  $^{222}\text{Rn}$  in aria, la concentrazione risulta ridotta all'1% del valore iniziale ad una distanza di circa 730 cm dall'origine. Tale distanza si riduce a circa 10 cm se il mezzo isotropo è l'acqua, in cui il coefficiente di diffusione  $D$  vale circa  $10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ .

Pur considerando le condizioni più favorevoli e tali da esaltare il fenomeno della diffusione, questa non è in grado di spiegare da sola la migrazione del radon per lunghe distanze, quale si osserva in natura.

### ***1.5.2. Migrazione per convezione***

La convezione dei fluidi dai quali il radon viene trasportato si origina in presenza di adeguati gradienti termici. La condizione di innesco del moto convettivo, dipendente da parametri quali la permeabilità idraulica  $K$  della roccia, le dimensioni  $h$  delle celle convettive, la viscosità  $\eta$  del fluido e la diffusività termica  $D$ , è la seguente (Horton, Rogers 1945, Lapwood 1948) :

$$K \cdot g \cdot h^2 \cdot \left(\frac{dT}{dz}\right)_{\text{net}} \cdot \left(\frac{dP}{dz}\right) > 4 \pi \cdot D \cdot \eta \quad (1.4)$$

Un gradiente geotermico di  $30 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ , quale quello che normalmente si stabilisce, è sufficiente per attivare movimenti convettivi in rocce con permeabilità dell'ordine di

$10^{-7} \div 10^{-8}$  cm e spessori di pochi metri.

La (1.4) mostra chiaramente come la convezione sia agevolata in presenza di gradienti geotermici anomali, di incrementi della permeabilità (che possono verificarsi per fessurazione o fagliazione della crosta terrestre), di riduzioni della viscosità dei fluidi ed in presenza di quantità rilevanti di gas nel sottosuolo.

Di notevole interesse è il modello delle celle convettive proposto da Mogro Campero e Fleisher; esso consente di interpretare alcune anomalie della concentrazione di radon come le diminuzioni rilevate nella stagione calda quando, a causa del riscaldamento solare della superficie terrestre, si crea una zona di inversione del gradiente termico che inibisce parzialmente i fenomeni convettivi.

### ***1.5.3. Migrazione per trasporto di gas (gas carrier)***

Questo modello è in grado di fornire una spiegazione circa la possibilità che ha il radon di percorrere lunghe distanze attraverso le formazioni rocciose.

Nelle profondità terrestri si formano costantemente quantità variabili di svariati gas (tra i quali  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  e  $\text{H}_2$ ) che, attraverso le fessure e gli interstizi, muovono verso la superficie terrestre sotto forma di microbolle.

Il processo naturale principale che porta alla formazione di tali gas è il termometamorfismo; ad esso si aggiungono processi organici o magmatici che, localmente, possono acquistare notevole rilevanza. Qualunque sia l'origine dei gas, questi sono in grado di raggiungere la superficie terrestre con tassi piuttosto elevati.

L'effetto della presenza dei flussi ascendenti di gas è particolarmente efficace nei confronti del radon presente negli interstizi e nelle porosità intergranulari della roccia, ma anche nei riguardi del radon presente nelle acque, svolgendo per così dire un'opera di degassaggio. Il radon si lega così alle microbolle, con legami di Van der Waals e dipolari, raggiungendo velocità di migrazione maggiori di quelle caratteristiche dei processi di diffusione e convezione (Kristiansson-Malmqvist, 1982, Varhegyi et al., 1986, Dongarrà-Martinelli, 1993).

L'entità del fenomeno del gas carrier è esaltata in presenza di forti stress geologici, quali quelli associati alla fase che precede gli eventi sismici (Mogro Campero, Fleisher, 1979).

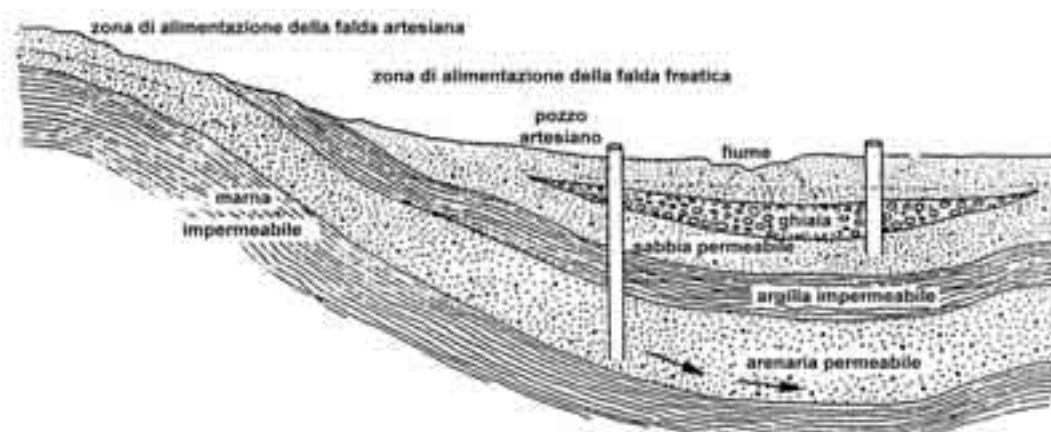
## 1.6. Il radon nelle falde acquifere

Le falde acquifere si originano per la presenza di strati rocciosi a diversa permeabilità.

L'acqua discende attraverso alcuni strati a maggiore permeabilità, dovuta a fratture nelle rocce coerenti o alla presenza di interstizi in quelle sciolte, fino al raggiungimento degli strati impermeabili. Durante l'attraversamento degli strati superiori l'acqua si arricchisce di minerali e sostanze presenti nelle rocce; è in questa fase che si ha l'assorbimento del radon che abbandona le masse solide.

Sullo strato impermeabile l'acqua si raccoglie a formare la falda (falda freatica), raggiungibile con perforazioni di modesta profondità; talvolta le acque riescono a superare il primo strato impermeabile, raccogliendosi in una fascia compresa tra due successivi strati impermeabili, come mostrato in figura 1.5; la presenza di una sia pur contenuta pendenza consente alle acque di muoversi per gravità. Queste falde, dette falde artesiane, sono raggiungibili, perforando il primo strato impermeabile di copertura, con pozzi di notevole profondità.

Ci si soffermerà sulle caratteristiche delle acque di falda in relazione al contenuto di radon.



**Figura 1.5** - Falda freatica e falda artesisiana

Nella tabella 1.1 sono riportati i valori medi della concentrazione di radon riscontrati in falde originatesi in sistemi rocciosi di natura diversa.

I diversi tipi di falde acquifere possono suddividersi in linea di principio in due grandi

categorie: falde acquifere da rocce cristalline e falde acquifere da rocce sedimentarie.

Aquifer type	No. of samples	<sup>222</sup> Rn (Bq/m <sup>3</sup> )
<b><i>Granites</i></b>		
Maine	136	817700
North Carolina	24	390800
South Carolina	22	298800
Sweden	14	92000
<b><i>Metamorphic rocks</i></b>		
Maine		
Sillimanite Zone	35	504300
Chlorite Zone	56	41000
North Carolina		
Gneiss / Schist	71	83000
Metavolcanic	21	49900
South Carolina		
High grade - Monazite Belt	12	53400
Medium grade	11	118100
Lowgrade	7	274700
Sweden		
Gneiss	8	26000
<b><i>Limestone</i></b>		
Florida	165	550
South Carolina	15	1300
North Carolina	22	3440
Sweden	12	24000
<b><i>Unconsolidated sand aquifers</i></b>		
North Carolina Coastal Plain	139	15760
Minnesota (Glacial Drift)	350	11470
South Carolina		
Lower Coastal Plain	15	6950
Middle Coastal Plain	34	9470
Upper Coastal Plain	29	17340

**Tabella 1.1** - Valori medi della concentrazione di Rn in acqua per falde di varia natura [5]

### ***1.6.1. Falde acquifere da rocce cristalline***

Le rocce cristalline comprendono le rocce ignee e quelle metamorfiche, nelle quali l'acqua permea attraverso fenditure e fratture della struttura.

Le rocce ignee possono suddividersi a loro volta in rocce acide, neutre o basiche, in funzione del loro contenuto di Silicio e debbono la loro composizione ai magmi dalle quali hanno origine:

**Magmi ricchi in Silicio ed Alluminio** - Questi magmi danno origine a rocce chiare a basso peso specifico, contenenti pochi silicati, molti silico alluminati ed una certa quantità di silice libera ( $\text{SiO}_2$ ). Il tenore in Silicio è superiore al 65%. Si tratta della famiglia delle rocce sialiche, dette anche acide o persiliciche, della quale fanno parte i graniti, generati a grande profondità dove consolidano lentamente (milioni di anni) passando a masse durissime e quindi incuneandosi tra le altre strutture, risalendo fino in superficie.

**Magmi intermedi** - Presentano un tenore in Silicio compreso tra il 50% ed il 65% e danno origine a rocce a composizione intermedia, né molto chiare né molto scure, dette neutre o mesosiliciche.

**Magmi poveri in Silicio** - Con tenore in Silicio compreso tra il 40% ed il 50% e con un contenuto maggiore di elementi quali Ferro, Magnesio e Calcio, danno origine a rocce scure ad alto peso specifico, dette basiche o iposiliciche, formate da silicati, pochi silico alluminati e mancanti di silice libera. Fanno parte di questa famiglia i basalti, di colore grigio scuro e di origine vulcanica.

Come detto, le rocce acide (graniti) presentano un elevato tenore di Uranio, al contrario delle rocce basiche (basalti).

Le acque che lambiscono le rocce granitiche sono quindi quelle che presentano una maggiore concentrazione di radon: il valore medio supera i 296 Bq/l ma esistono pozzi privati in cui la concentrazione di radon può raggiungere i 55000 Bq/l.

Le acque che lambiscono le rocce basaltiche, per il basso tenore di Uranio proprio di queste ultime e per l'assenza di processi di arricchimento naturale, quale ha luogo nelle rocce sedimentarie, presentano ovviamente una bassa concentrazione di radon (circa

10 ÷ 20 Bq/l).

Le rocce metamorfiche hanno origine da quelle ignee e da quelle sedimentarie in presenza di elevatissime pressioni statiche o dinamiche (formazioni di catene montuose) o di altissime temperature; ne deriva una profonda alterazione delle caratteristiche chimico-fisiche delle rocce originarie. La composizione delle rocce metamorfiche, e quindi la concentrazione di radon delle acque che le lambiscono, sono tuttavia legate a quelle delle rocce da cui derivano ed al grado di metamorfismo. Esperienze condotte in diverse zone degli Stati Uniti hanno tuttavia mostrato l'assenza di una stretta correlazione tra il grado di metamorfismo di tali rocce e le concentrazioni di radon rilevate; queste sembrano essere piuttosto attribuibili a fenomeni di arricchimento naturale in Uranio.

In conclusione, in virtù del maggiore contenuto di Uranio, e soprattutto per i fenomeni di trasferimento del radon dalle rocce al liquido (cfr. § 1.4), le acque delle falde da rocce cristalline risultano quelle che presentano la maggiore concentrazione di radon.

#### ***1.6.2. Falde acquifere da rocce sedimentarie***

Le rocce sedimentarie derivano dalla deposizione, su terre emerse o sul fondo di bacini acquiei, di materiali di varia origine, organica o inorganica, i più rilevanti dei quali sono quelli provenienti dalla disgregazione di rocce ignee o metamorfiche<sup>3</sup> trasportate dai fiumi o dai ghiacciai. Il passaggio da sedimenti freschi a rocce coerenti avviene in tempi lunghi.

Le rocce originate dall'accumulo di frammenti di altre rocce disgregate da agenti esogeni (acqua, vento, ecc.) sono dette detritiche o clastiche.

La deposizione di composti organici dà origine a rocce dette organogene o biogene, mentre la precipitazione di vari sali in ambienti favorevoli forma le rocce di origine chimica, tra le quali si ricordano le rocce calcaree, le argille e il tufo.

La composizione delle rocce clastiche varia fortemente in relazione ai materiali di origine; le acque di falda ad esse associate presentano tuttavia concentrazioni di radon relativamente basse, che raramente eccedono i 40 Bq/l.

Le acque da rocce calcaree sono in genere a basso contenuto di radon, sebbene

---

<sup>3</sup> Si noti come si sia chiuso il ciclo di trasformazioni che consente la formazione di ciascuna roccia a partire da una qualsiasi delle altre (ciclo litigenetico), le rocce metamorfiche si formano da quelle ignee o dalle sedimentarie sottoposte a forti pressioni o elevate temperature, le rocce ignee per rifusione di quelle metamorfiche o sedimentarie, queste ultime per frantumazione e deposizione delle rocce ignee e metamorfiche.



concentrazioni maggiori possano derivare da processi di arricchimento naturale.

## **1.7. Il radon come precursore di eventi sismici**

L'interesse per il radon come precursore di eventi sismici ha avuto origine verso la metà degli anni '60 quando si riscontrarono evidenti anomalie della sua concentrazione nelle acque sotterranee nel periodo precedente il terremoto di Tashkent. Il passo successivo è consistito nell'interpretazione delle anomalie riscontrate. Sono stati proposti al riguardo diversi modelli che consentono una previsione affidabile del ritardo temporale del sisma rispetto al verificarsi dell'anomalia, dell'intensità e della collocazione dell'epicentro dello stesso.

Nessuno di tali modelli sembra tuttavia in grado di spiegare in maniera esauriente tutte le anomalie evidenziate finora.

### ***1.7.1. Principali caratteristiche delle anomalie di radon***

Le anomalie di  $^{222}\text{Rn}$  osservate presentano una vasta distribuzione spaziale rispetto all'epicentro del terremoto (dalle decine alle centinaia di km di distanza). Esse sono inoltre riscontrabili in diversi tipi di acque di falda sebbene sia preferibile in linea di principio, per il monitoraggio, la scelta di siti che presentino valori di per sé più elevati.

Sebbene esistano alcune eccezioni, sembra esistere una correlazione positiva tra la magnitudo del terremoto e alcuni parametri caratteristici quali: la distanza alla quale l'anomalia è rilevabile, l'anticipo temporale rispetto all'evento sismico, l'ampiezza e la forma dell'anomalia. Riguardo quest'ultimo aspetto, si distinguono le seguenti forme caratteristiche:

- a) presenza di uno o più picchi isolati (con polarità positiva o negativa);
- b) crescita (o riduzione) monotona, con o senza plateau prima dell'evento sismico;
- c) fluttuazioni regolari o irregolari.

Per quanto riguarda l'anticipo temporale rispetto all'evento sismico, si definisce *Tempo Precursore* l'intervallo di tempo esistente tra l'inizio dell'anomalia ed il verificarsi

dell'evento sismico.

A tale proposito si suole suddividere i precursori dei terremoti in

- 1) precursori di lungo termine (tempo precursore compreso tra alcuni decenni e alcuni anni);
- 2) precursori di medio termine (tempo precursore compreso tra alcuni anni e alcuni mesi);
- 3) precursori di breve termine (tempo precursore compreso tra alcune settimane e alcune ore).

Hauksson (1981) propose le seguenti definizioni per caratterizzare le anomalie di radon osservate :

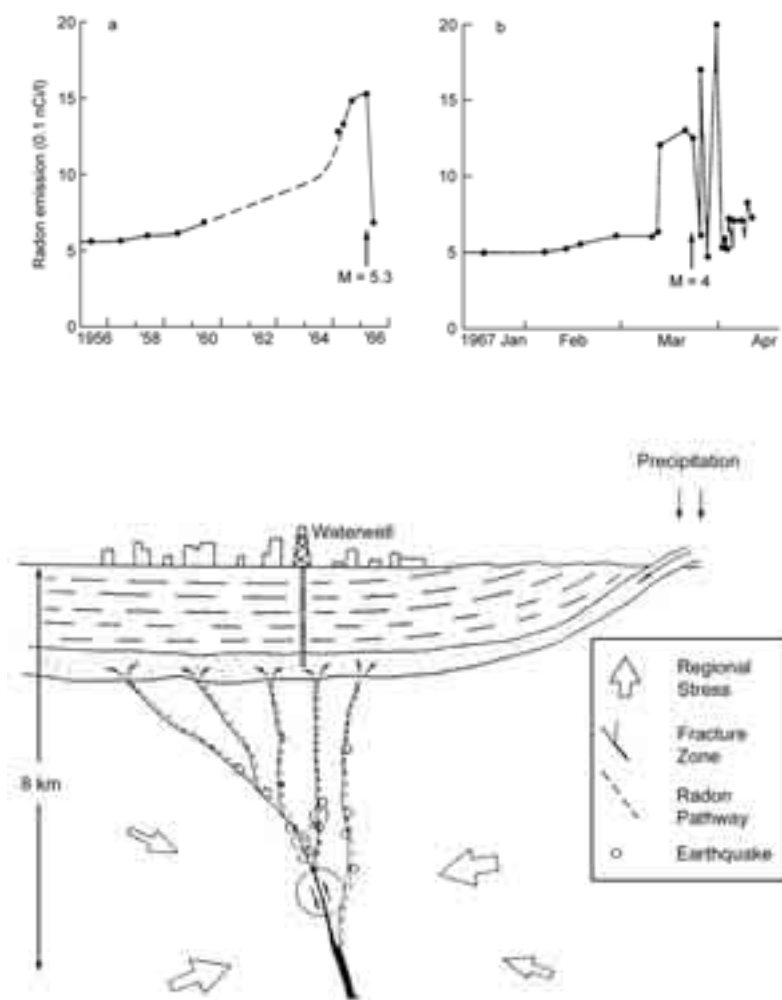
<i>Ampiezza Relativa di Picco :</i>	rapporto tra il valore più elevato riscontrato durante l'anomalia ed il valore di fondo;
<i>Tempo di Inizio</i> (del Tempo precursore) :	istante in cui ha inizio l'anomalia;
<i>Tempo di Fine :</i>	istante in cui si osserva il ritorno ai valori normali (generalmente coincidente con l'istante in cui si verifica il terremoto).

Ad ogni anomalia si assegna un Fattore di Qualità (A, B, C e D) in relazione alla possibilità di distinguere con precisione i *Tempi di Inizio* e *di Fine*.

### ***1.7.2. Le anomalie di radon: breve sintesi cronologica***

Il primo evento tellurico sul quale furono intrapresi studi inerenti possibili precursori idrogeologici fu il terremoto di Ashkabad, Uzbekistan sovietico (1948), che causò decine di migliaia di vittime.

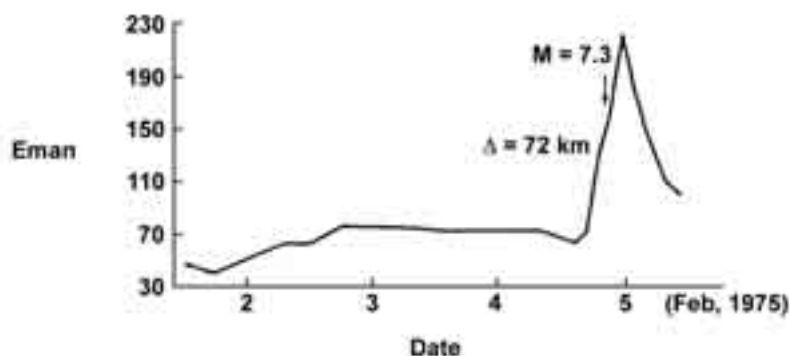
Come accennato più volte in precedenza, la prima evidenza sperimentale riconosciuta di anomalia di  $^{222}\text{Rn}$  si è avuta tuttavia nel periodo precedente il terremoto di Tashkent, USSR, (M = 5.3) del 26/4/1966. Nella fig. 1.6 è riportato l'andamento della concentrazione di radon osservato in occasione della scossa principale (a) e delle successive scosse di assestamento (b). Dalla figura si nota l'andamento monotono crescente caratterizzato da un Tempo precursore di una decina di anni (precursore a lungo termine).



**Figura 1.6** - Anomalie di radon riscontrate in occasione del terremoto di Tashkent (1966); a) scossa principale, b) aftershocks. (Olumov e Mavashev, 1967)

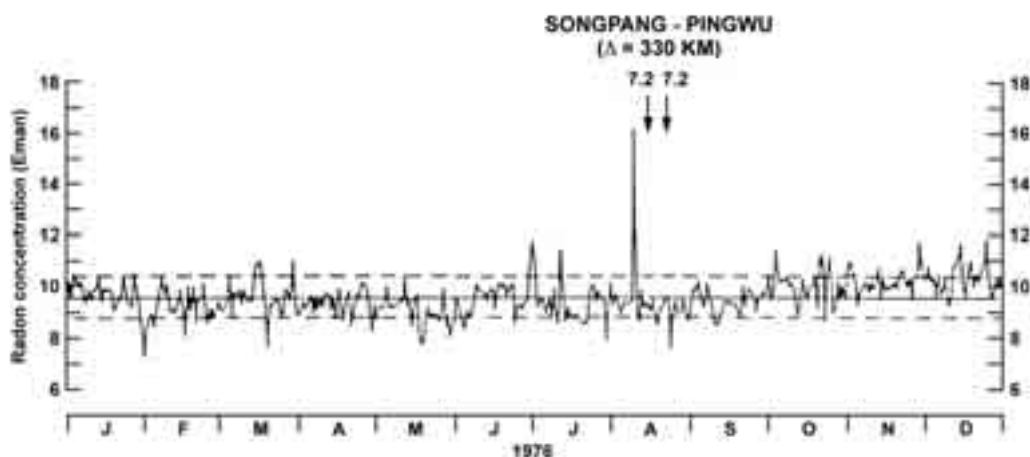
Successive rilevazioni sistematiche sono state effettuate in Unione Sovietica<sup>4</sup> e in Cina ed hanno portato al primo storico successo nella previsione del terremoto di Haicheng, penisola di Liaotung, del 4/2/1975 ( $M = 7.3$ , fig. 1.7); si trattò in quel caso di precursore di breve termine.

<sup>4</sup> Attualmente in Armenia è operante una rete per il controllo geochimico dell'attività sismica, costituita da sei stazioni per il monitoraggio in continuo delle acque.



**Figura 1.7** - Anomalie di radon rilevate in occasione del terremoto di Haicheng del 1973 (Tang, 1980). [ 1 Eman =  $10^{-10}$  Ci/l = 3.7 Bq/l ]

Circa un anno dopo si verificarono due scosse ravvicinate di magnitudo 7.2 (Songpan-Pingwu); anche in quel caso (fig. 1.8) si è potuto osservare qualche giorno prima del sisma un picco molto marcato ad una distanza notevole dall'epicentro (330 km).

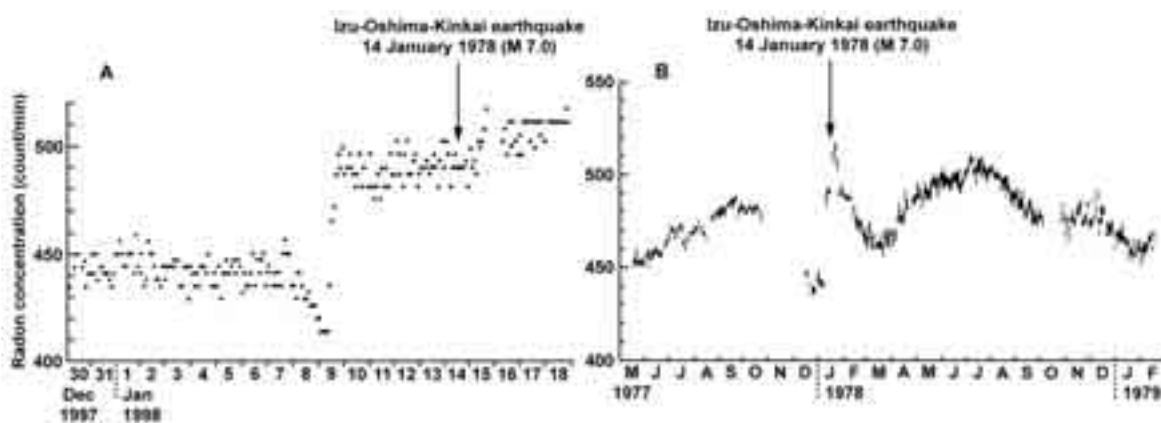


**Figura 1.8** - Anomalie registrate in occasione delle scosse sismiche di Songpan-Pingwu, 1976 (King, 1985). [ 1 Eman =  $10^{-10}$  Ci/l = 3.7 Bq/l ]

Attualmente sono presenti circa 300 stazioni geosismologiche distribuite sul territorio cinese.

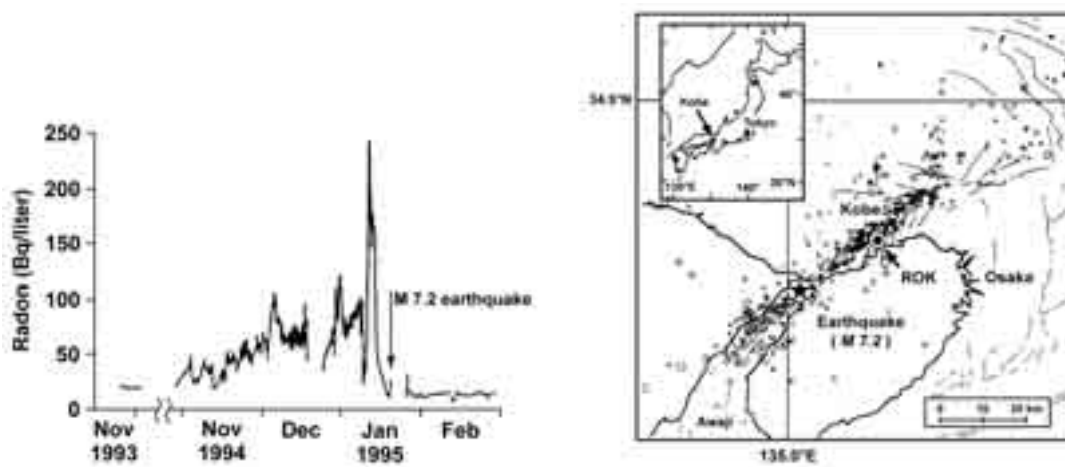
In Giappone l'attività di ricerca in questa direzione ebbe inizio nel 1973. Numerose prove sperimentali sono state da allora raccolte, tra le quali appare estremamente significativa quella riportata nella fig. 1.9 relativa al terremoto di Izu-Oshima-Kinkai del

1978 (Wakita et al, 1980). Si osservò nell'occasione una progressiva riduzione della concentrazione media di  $^{222}\text{Rn}$  in acqua, iniziata circa tre mesi prima dell'evento sismico, seguita da un repentino incremento nelle ore immediatamente precedenti il terremoto.



**Figura 1.9** - Anomalie di radon registrate in occasione del terremoto di Izu Oshima Kinkai, 1978 (Wakita et al., 1980).

Un ulteriore esempio di rilievo è costituito dal recente terremoto di Kobe (17/1/1995) in cui, al contrario, si è osservato dapprima un aumento progressivo della concentrazione di radon nei mesi precedenti il sisma e quindi un picco marcato con successivo ritorno ai valori normali (fig. 1.10) [6].



**Figura 1.10** - Anomalie di radon registrate in occasione del terremoto di Kobe, 1995 (Igarashi et al., 1995).

Nel 1975 negli Stati Uniti venne avviato un programma di monitoraggio delle acque in gran parte del territorio nazionale, e in particolare in molte zone della California centrale ad intensa attività sismica (Faglia di San Andreas), con risultati soddisfacenti (King, 1980).

In Italia sono pochi gli studi effettuati su acque di pozzi e di sorgente; il terremoto del 23/11/1980 in Irpinia fu tuttavia preceduto da anomalie di radon in pozzi situati nelle vicinanze di Roma e Rieti (circa 250 km dall'epicentro del sisma).

## **2. Sistema $\gamma$ per la misura della concentrazione di radon in un campione d'acqua**

### **2.1. Breve descrizione del sistema**

In questa prima fase dell'attività di ricerca si è valutata la possibilità di realizzare un sistema per la misura della concentrazione di radon in acqua con componentistica elettroidraulica facilmente reperibile ed affidabile. Mediante l'impiego di un inseritore a tempo meccanico, di microinterruttori, di elettrovalvole, di un campionatore del volume di liquido da analizzare, di un beaker Marinelli, di uno spettrometro  $\gamma$  dotato di preamplificatore e modulo di alta tensione, di un analizzatore multicanale su scheda installato in un personal computer e di un software dedicato sono stati conseguiti risultati incoraggianti per il successivo sviluppo ed affinamento della tecnica.

Per la descrizione del sistema mostrato in figura 2.1 e la presentazione delle informazioni ottenibili alimentandolo con acqua a concentrazione di radon variabile nel tempo si rimanda per brevità all'allegato C. Ci si soffermerà soltanto su quegli aspetti di progettazione non trattati nella pubblicazione.

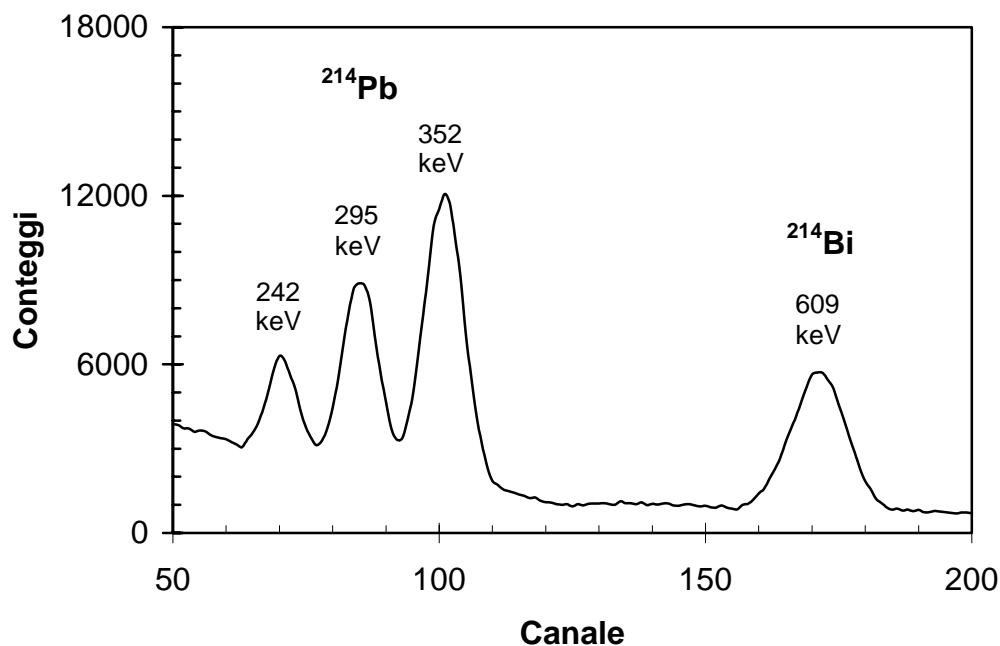
### **2.2. Scelta delle dimensioni dello scintillatore**

Gli impulsi che provengono dallo scintillatore a NaI(Tl), opportunamente amplificati, vengono processati da un analizzatore multicanale che, nel caso del  $^{222}\text{Rn}$ , restituisce uno spettro di ampiezze del tipo mostrato in figura 2.2.



**Figura 2.1** - Sistema  $\gamma$  per la misura della concentrazione di radon acqua





**Figura 2.2** - Spettro  $\gamma$  del  $^{214}\text{Pb}$  e del  $^{214}\text{Bi}$  usati per la rivelazione del  $^{222}\text{Rn}$ .  
Scintillatore a NaI(Tl) 3"×3"

Le modalità con cui risalire al valore della concentrazione di radon in aria o in acqua dall'analisi dello spettro in questione, in funzione del metodo di rivelazione adottato, sono ampiamente discusse negli allegati B, E e G. Per utilizzare al meglio lo spettro acquisito si deve scegliere una ROI (Region Of Interest) di integrazione tale da massimizzare il rapporto segnale/rumore (o figura di merito)

$$\text{Conteggi}_{\text{netti}} / \sqrt{\text{Fondo}}$$

e l'efficienza di conteggio

$$\text{Eff}_{\text{cont}} = \frac{\text{Conteggi}_{\text{netti}}}{\text{Concentrazione}_{\text{Rn}} \cdot \text{Tempo}_{\text{acquisizione}}} \frac{\text{cpm}}{\text{Bq/l}};$$

al tempo stesso si deve minimizzare la minima attività rivelabile :

$$\text{MDA} = \frac{\text{LLD}}{\text{Eff}_{\text{cont}}} \text{ Bq/l}$$

essendo il limite inferiore di rivelazione (LLD) dato da

$$LLD = 3 \cdot \frac{\sqrt{\text{Fondo}}}{\text{Tempo}_{\text{acquisizione}}} \text{ cpm}$$

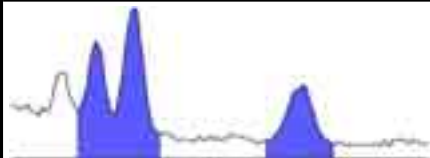

Poiché queste condizioni non possono essere contemporaneamente soddisfatte occorre studiare l'andamento dei suddetti parametri al variare della dimensione dello scintillatore (2''×2'' o 3''×3''), che nel caso specifico implica la scelta del beaker Marinelli (0.69 o 0.95 l), del tempo di acquisizione e della ROI.

Si è quindi proceduto all'arricchimento dell'acqua nel contenitore da 40 l ad una concentrazione di circa  $473 \pm 16$  Bq/l ed al successivo spillaggio in parallelo in due beaker Marinelli da 0.69 e 0.95 l. Adattando di volta in volta il sistema di rivelazione, questi sono stati inseriti all'interno dello stesso pozzetto a basso fondo ed è stato avviato un conteggio di 3 ore.



Integrando i conteggi acquisiti sulle ROI così definite :

- Picchi del  $^{214}\text{Pb}$  a 295 e 352 keV, picco del  $^{214}\text{Bi}$  a 609 keV
- Picchi del  $^{214}\text{Pb}$  a 295 e 352 keV, picco del  $^{214}\text{Bi}$  a 609 keV e regione Compton del  $^{214}\text{Bi}$



per tempi di conteggio pari a 15, 30, 45, 60 120 e 180 minuti si sono costruite le tabelle seguenti in cui sono riportati i valori di efficienza (cpm/Bq l<sup>-1</sup>) per le configurazioni 2''×2'' e 3''×3'' e gli andamenti del rapporto segnale/rumore e della MDA ; quest'ultimo andamento è anche in figura 2.3.

Efficienza di conteggio (cpm/Bq l <sup>-1</sup> )			
			
<b>2'' × 2''</b>	<b>3'' × 3''</b>	<b>2'' × 2''</b>	<b>3'' × 3''</b>
1.95 ± 0.07	4.76 ± 0.16	2.38 ± 0.08	5.82 ± 0.20

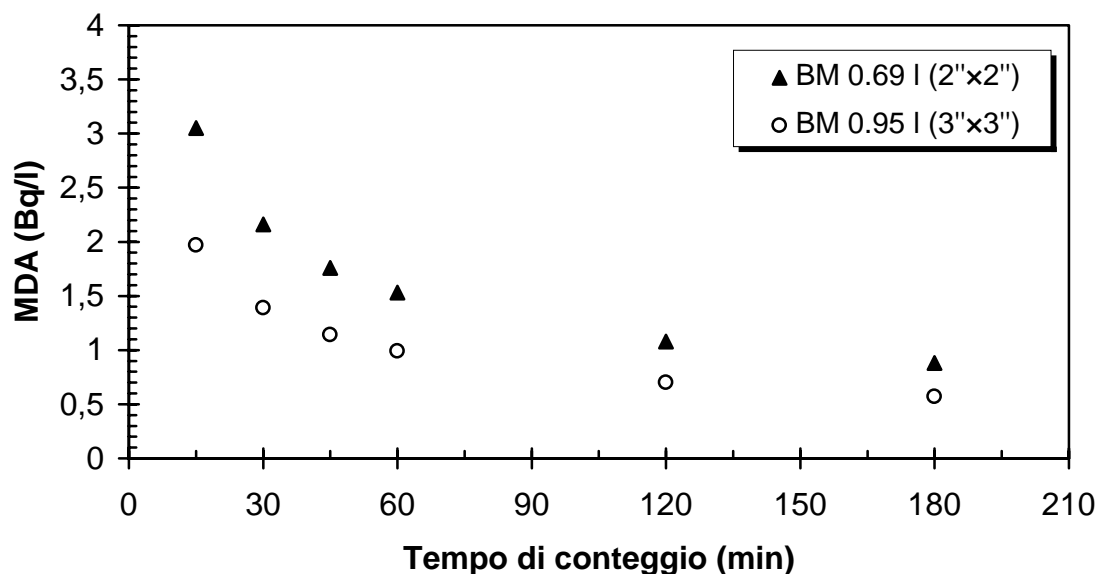
**Tabella 2.1** - Efficienza di conteggio (cpm/Bq l<sup>-1</sup>) con beaker Marinelli 2''×2'' e 3''×3'' in funzione del tempo di conteggio

Tempo di acquisizione (minuti)	Rapporto S/N			
				
	2" x 2"	3" x 3"	2" x 2"	3" x 3"
15	465.0 ± 8.9	719.4 ± 8.7	415.8 ± 6.2	651.9 ± 6.2
30	657.6 ± 9.8	1017.4 ± 12.4	588.0 ± 7.1	921.9 ± 8.8
45	805.4 ± 11.9	1246.0 ± 15.1	720.2 ± 8.7	1129.1 ± 10.8
60	930.0 ± 13.8	1438.8 ± 17.5	831.6 ± 10.0	1303.7 ± 12.4
120	1315.2 ± 19.5	2034.7 ± 24.7	1176.1 ± 14.2	1843.7 ± 17.6
180	1610.8 ± 23.9	2492.0 ± 30.3	1440.4 ± 17.4	2258.1 ± 21.5

**Tabella 2.2** - Rapporto segnale/rumore con beaker Marinelli 2"×2" e 3"×3" in funzione del tempo di conteggio

Tempo di acquisizione (minuti)	MDA (Bq/l)			
				
	2" x 2"	3" x 3"	2" x 2"	3" x 3"
15	3.05 ± 0.12	1.97 ± 0.07	3.41 ± 0.13	2.18 ± 0.08
30	2.16 ± 0.08	1.39 ± 0.05	2.41 ± 0.09	1.54 ± 0.05
45	1.76 ± 0.07	1.14 ± 0.04	1.97 ± 0.07	1.26 ± 0.04
60	1.53 ± 0.06	0.99 ± 0.04	1.71 ± 0.06	1.09 ± 0.04
120	1.08 ± 0.04	0.70 ± 0.03	1.21 ± 0.04	0.77 ± 0.03
180	0.88 ± 0.03	0.57 ± 0.02	0.99 ± 0.04	0.63 ± 0.02

**Tabella 2.3** - Minima attività rivelabile (Bq/l) con beaker Marinelli 2"×2" e 3"×3" in funzione del tempo di conteggio



**Figura 2.3** - Minima attività rivelabile (Bq/l) con beaker Marinelli 2''x2'' e 3''x3'' in funzione del tempo di conteggio

Si può concludere che, dal punto di vista dell'ottimizzazione del conteggio, la configurazione con beaker Marinelli 3''x3'' è sicuramente preferibile rispetto a quella con beaker Marinelli 2''x2''. Tuttavia l'impiego del beaker di dimensioni più piccole sebbene fornisca mediamente un segnale dell'ordine del 40% (per le ROI usate) di quello ottenibile con il beaker Marinelli 3''x3'', consente d'altra parte una riduzione in volume e in peso dello spettrometro  $\gamma$ , à parità di spessore schermante.

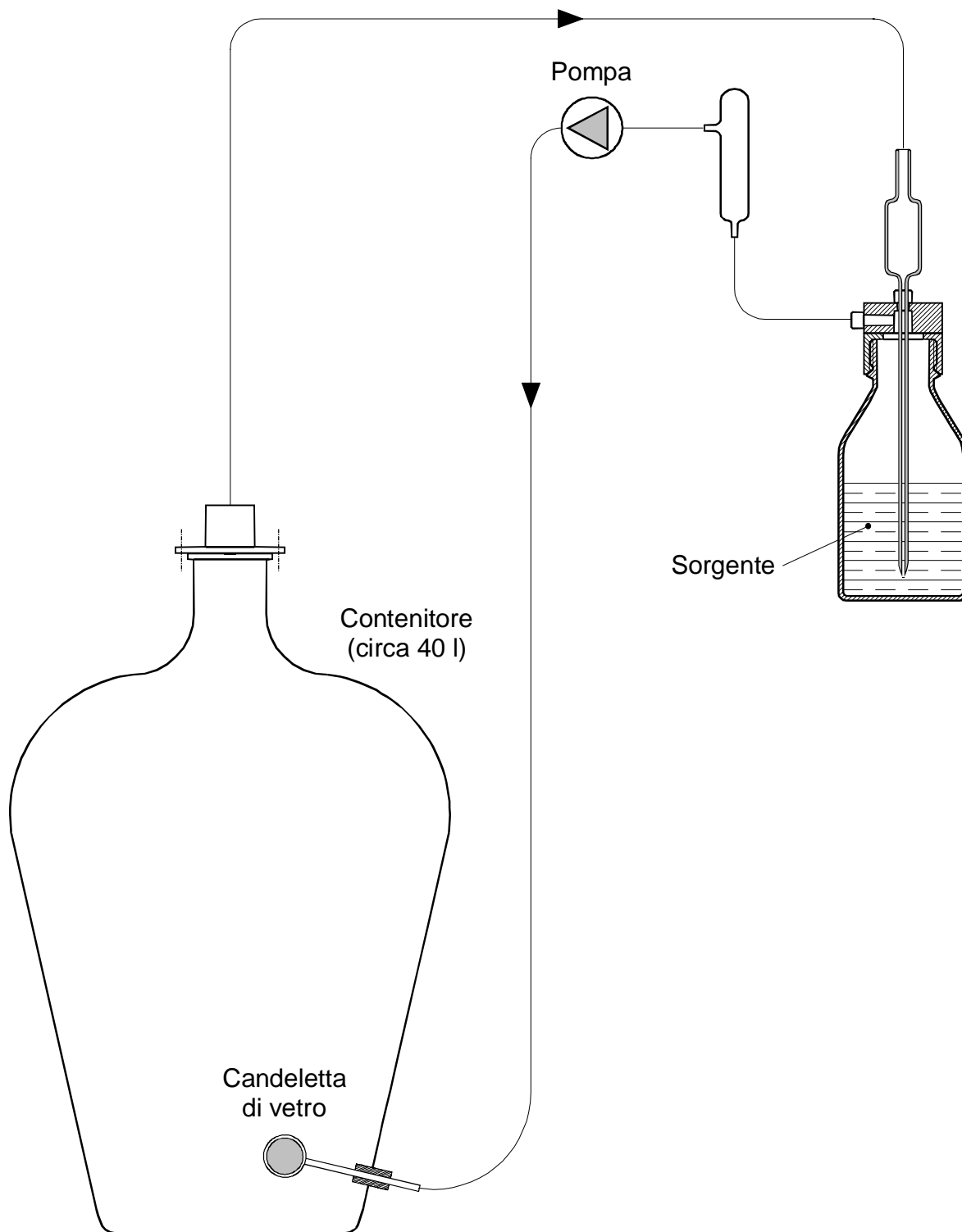
Inoltre, a vantaggio del beaker Marinelli 2''x2'', per tempi di conteggio ancora ragionevoli (1 ora) la minima attività rivelabile scende a valori tali da rendere possibile la misura di concentrazioni di radon in acqua dell'ordine di  $5 \div 10$  Bq/l.

Si è optato quindi per l'adozione di un rivelatore con scintillatore a NaI(Tl) da 2''x2'' e del relativo beaker Marinelli da 0.69 l.

### 2.3. Sistema per l'arricchimento di radon in acqua

Tale sistema, riportato nelle figure 2.4 e 2.5, consta essenzialmente di una sorgente radioattiva per la produzione di radon, di un contenitore dell'acqua da arricchire e di una

pompa per il ricircolo in circuito chiuso dell'aria che trasferisce il radon dalla sorgente al volume d'acqua.



**Figura 2.4** - Schema del sistema per l'arricchimento di radon in acqua



**Figura 2.5** - Foto del sistema per l'arricchimento di radon in acqua

La sorgente di radon impiegata (figura 2.6), contenuta in una bottiglia da 300 cm<sup>3</sup>, è costituita da radio disperso in dischi di vetro sinterizzati immersi in una soluzione di RaCl<sub>2</sub>

acidificata con  $\text{HNO}_3$  ( $\text{PH} < 2$ ), a cui si è aggiunto  $\text{BaCl}_2$  al fine di evitare la diffusione del radio all'interno delle pareti della bottiglia : il bario infatti, presente in maggiori quantità, satura gli interstizi del vetro al posto del radio che così rimane in soluzione (o intrappolato nei dischi di vetro sinterizzati). Il volume complessivo della sorgente è di circa  $150 \text{ cm}^3$ . L'attività è stata valutata in circa 40 kBq ; anche se l'efficienza di estrazione del radon dai dischi di vetro sinterizzato non si è dimostrata buona, si è comunque potuto disporre di acqua a concentrazione di radon sufficientemente elevata per le esigenze del sistema di misura [7].



**Figura 2.6** - Sorgente impiegata per la produzione di radon

L'aria sovrastante l'acqua contenuta in un contenitore da circa 40 l viene fatta gorgogliare nella soluzione radioattiva, l'aria ricca di radon viene aspirata da una pompa a membrana avente portata nominale di 2.5 l/min ed è inviata in prossimità dell'estremità inferiore del contenitore dell'acqua da arricchire ove, frazionata da una candeletta di vetro, viene fatta gorgogliare. Come si può vedere dallo schema in fig. 2.1 sono stati usati due polmoni con lo scopo di migliorare la sicurezza del sistema di arricchimento : il polmone in corrispondenza alla sommità della sorgente serve a salvaguardare la quest'ultima in caso di depressione nel contenitore da 40 l<sup>1</sup> ; quello posto immediatamente prima l'aspirazione della pompa serve ad impedire che goccioline della soluzione radioattiva disperse nell'aria in fase di gorgogliamento possano contaminare la pompa ed il contenitore dell'acqua.

Infine è opportuno ricordare che un utilizzo troppo frequente del sistema di arricchimento comporta il trasferimento in acqua di attività di radon ridotte in quanto si deve tenere conto del fatto che l'equilibrio secolare tra radio e radon si può considerare raggiunto soltanto dopo circa 20 giorni. Vale infatti la seguente relazione che lega l'attività percentuale  $A_{\%}(t)$  del radon al tempo  $t$  trascorso dalla sua precedente estrazione (che per semplicità si suppone completa<sup>2</sup>) dalla sorgente :

$$A_{\%}(t) = \frac{A(t)}{A_{\text{sat}}} \cdot 100 = \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_{\text{Rn}}}} \right) \cdot 100 \quad (2.1)$$

essendo  $A_{\text{sat}}$  l'attività di saturazione della sorgente e  $\tau_{\text{Rn}}$  la vita media del radon (circa 5.515 giorni). Tale andamento è stato graficato in figura 1.2. Per una trattazione dettagliata della modalità con cui il radon si distribuisce in un generico contenitore in presenza delle fasi liquida ed aeriforme si rimanda all'allegato D.

<sup>1</sup> Si osservi che al termine della procedura di arricchimento il livello dell'acqua nel contenitore scende finché il carico idraulico dovuto all'altezza del liquido non è bilanciato dalla pressurizzazione del ramo di mandata del circuito. Corrispondentemente il ramo di aspirazione dell'aria dalla sommità del contenitore, trovandosi in depressione, tende ad aspirare il liquido dalla sorgente.

<sup>2</sup> Per tempi di ricircolo sufficientemente lunghi la concentrazione di radon nella fase liquida e gassosa della sorgente eguaglia quella nelle fasi corrispondenti del contenitore da 40 l. Pertanto nella soluzione radioattiva restano circa 20 Bq di radon "fruibile" al termine del ricircolo, corrispondenti a meno del 4% dell'attività inizialmente disponibile : quantitativo praticamente trascurabile.



## 2.4. Campionatore del volume di acqua da inviare al beaker Marinelli

### 2.4.1. Motivi per l'impiego del campionatore

Si è già accennato al fatto che per la necessità di collaudare il sistema in laboratorio per tempi relativamente prolungati (tipicamente di una settimana) e per l'esiguità della riserva di acqua arricchita disponibile, si è optato per il campionamento del quantitativo di acqua da inviare al beaker Marinelli in ogni ciclo. Inoltre, qualora si fosse inviata l'acqua dal bottiglione da 40 l direttamente al beaker Marinelli ci sarebbe stato l'ulteriore svantaggio di non poter garantire una portata d'acqua uniforme al succedersi dei vari cicli di ogni prova a causa della variazione continua delle caratteristiche idrauliche del sistema (quota del pelo libero dell'acqua di alimento nel bottiglione da 40 l variabile).

### 2.4.2. Descrizione del campionatore

Il campionatore del volume di acqua da inviare al beaker Marinelli consta di un cilindro di PVC trasparente alto 40 cm ed avente un diametro interno di 12 cm. Dei 4524 cm<sup>3</sup> disponibili, 445 cm<sup>3</sup> sono occupati da un galleggiante in plastica a tenuta sulla parete cilindrica. Uno scasso circonferenziale praticato nella parte inferiore del galleggiante, riempito con gomma impermeabile di bassa densità, ne migliora notevolmente la funzione. Al centro del galleggiante vi è un stelo su cui è calettato il disco di comando dei microinterruttori che determinano la chiusura delle varie elettrovalvole.

Volendo imporre un ricambio di acqua nel beaker Marinelli pari al triplo del suo volume (0.69 l), si deve disporre di  $0.69 \times 3 = 2.07$  l di acqua : ciò garantisce il rinnovo del liquido nel beaker Marinelli all'inizio di ogni ciclo, evitando un indesiderato effetto memoria altrimenti presente in acquisizioni di cicli contigui. Pertanto la quota a cui il galleggiante deve arrestarsi è pari a

$$h_{\text{arresto}} = \frac{2070}{\pi \frac{12^2}{4}} = 18.3 \text{ cm}$$

Risulta così indirettamente fissata la quota a cui deve trovarsi il microinterruttore X (si veda lo schema nell'allegato C)

#### 2.4.3. Scelta dei microinterruttori

In particolare risulta delicata la scelta del microinterruttore X che determina la disalimentazione delle elettrovalvole di rientro dell'aria nel contenitore da 40 l, di travaso dell'acqua dal contenitore al campionario e di svuotamento del beaker Marinelli. Occorre infatti determinare la spinta massima esercitabile dal disco di comando sulla levetta del microinterruttore.

Il volume dello scasso praticato nella parte inferiore del galleggiante è dato da

$$V_{\text{scasso}} = \pi (R_{\text{est}}^2 - r_{\text{int}}^2) h_{\text{scasso}} = \pi (4.95^2 - 2.95^2) 2 \cong 99 \text{ cm}^3$$

Avendo calcolato la densità della gomma con cui è riempito lo scasso, pari a

$$\rho_{\text{gomma}} = \frac{m_{\text{gomma}}}{V_{\text{scasso}}} = \frac{0.015}{0.000099} \cong 151.5 \text{ kg/m}^3$$

ne consegue che la spinta da essa esercitata vale

$$S_{\text{scasso}} = (\rho_{\text{acqua}} - \rho_{\text{gomma}}) g V_{\text{scasso}} = (1000 - 151.5) \cdot 9.81 \cdot 99 \cdot 10^{-6} = 0.824 \text{ N}$$

mentre quella esercitata dal resto del galleggiante in polietilene ad alta densità ( $\rho = 960 \text{ kg/m}^3$ ) vale

$$S_{\text{poliet.}} = (\rho_{\text{acqua}} - \rho_{\text{poliet.}}) g V_{\text{poliet.}} = (1000 - 960) \cdot 9.81 \cdot 346 \cdot 10^{-6} = 0.136 \text{ N}$$

essendo

$$V_{\text{poliet.}} = V_{\text{Tot}} - V_{\text{scasso}} = \pi R_g^2 H_g - V_{\text{scasso}} = \pi \cdot 5.95^2 \cdot 4 - 99 = 346 \text{ cm}^3$$

Tenuto conto che il peso dello stelo e del disco di comando è pari a

$$P_{\text{stelo \& disco}} = M_{\text{stelo \& disco}} \cdot g = 0.020 \cdot 9.81 \cong 0.196 \text{ N}$$

la spinta esercitabile dal galleggiante vale

$$S_{\text{Tot}} = S_{\text{scasso}} + S_{\text{polietilene}} - P_{\text{stelo \& disco}} = 0.824 + 0.136 - 0.196 = 0.764 \text{ N}$$

corrispondenti a  $0.764/9.81 \approx 78 \text{ g}$ . Pertanto, cautelativamente, si sceglierà un interruttore azionabile con una spinta  $\leq 70 \text{ g}$ .

## 2.5. Componentistica impiegata

- Inseritore a tempo meccanico VEMER Mod. VJ 552 1. Motore passo-passo con oscillatore al quarzo, n° 1 quadranti di 24 ore, tempo minimo di intervento pari a 15 minuti (96 cavalierini), contatto in uscita: in scambio 16A 250VAC, grado di protezione IP20.

La morsettiera numerata consente vari punti di accesso per i contatti elettrici. L'azione del cavalierino estratto è quella di determinare, al tempo programmato, la commutazione dell'interruttore interno che porta la connessione dai morsetti 1-2 ai morsetti 2-3. Il meccanismo dei cavalierini consente una versatilità di programmazione giornaliera molto vantaggiosa per la quale, unitamente all'aspetto economico, il dispositivo si fa preferire ad altri.

- Micropompa a membrana per gas KNF Mod. NMP 30 da 2.5 l/min, alimentazione: 12 VDC
- Microinterruttori MATSUSHITA Mod. ABV161261 250VAC/2A. Grado di protezione IP67, durata  $> 5 \times 10^5$  scatti,  $T_{\text{esercizio}}: -40 \div +85 \text{ } ^\circ\text{C}$
- Elettrovalvole a 2 vie RS Tipo 439-060 da 1/8" alimentate a 24VDC, potenza

nominale delle bobine : 8W, grado di protezione del connettore DIN : IP65, range di utilizzo :  $0 \div 10$  bar

- Batterie ricaricabili al piombo da 12VDC, 1.2 Ah della FIAMM, Mod. FG20121
- Caricabatterie per batterie al piombo COMPIT PB 24/0.3 Tipo A7-1276-1515 ; tensione e corrente di carica : 24VDC 300mA ; controllo della carica tramite LED
- Beaker Marinelli da 0.69 l in polietilene e metacrilato, con estremità superiore conica per facilitare il ricambio di acqua
- Spettrometro  $\gamma$  a basso fondo :
  - schermo realizzato con pallini di piombo (densità  $7 \text{ g/cm}^3$ ) contenuti in un cilindro di plexiglass ( $\phi_{\text{int}} = 29 \text{ cm}$ ). Poiché  $\rho_{\text{Pb}} = 11.35 \text{ g/cm}^3$ , lo spessore attenuante in piombo di fusione equivalente risulta essere di
 
$$x_{\text{equivalente}} = \left( R_{\text{int. cilindro}} - R_{\text{est. BM}} \right) \frac{\rho_{\text{Pb in pallini}}}{\rho_{\text{Pb di fusione}}} = 8.7 \cdot \frac{7}{11.35} \cong 5.4 \text{ cm}$$
 che ad esempio comporta un'attenuazione di un fattore  $\cong 18$  per i  $\gamma$  del  $^{226}\text{Ra}$
  - scintillatore a NaI(Tl) da  $2'' \times 2''$
  - fotomoltiplicatore HAMAMATSU Mod. R1306
  - preamplificatore e partitore di tensione TENNELEC Mod. TC 155A
  - alimentatore di alta tensione HAMAMATSU Mod. C 1309-52 funzionante a 800 VDC ; tensione di ingresso : 15 VDC fornita da un convertitore DC/DC Traco
  - convertitore DC/DC Traco Serie TEM 10 Ecoline da 10W ; tensione di ingresso :  $9 \div 18 \text{ VDC}$  ; tensione e corrente massima di uscita : 15VDC 300mA
  - alimentatore di bassa tensione stabilizzato K.E.R.T. Mod. AT 2 ; output 12VDC 2.5A. Alimenta il convertitore DC/DC Traco e la micropompa a membrana NMP 30
- Acquisizione ed elaborazione dati su personal computer equipaggiato con scheda multicanale EG&G ORTEC MCB Type 916-002 a 2048 canali. Software di gestione della scheda : MAESTRO II versione 1.11 della ORTEC. Programmazione del file di comando per la scheda multicanale ed elaborazione dei dati acquisiti : tramite software dedicato (si vedano gli allegati I, J).

## 2.6. Determinazione del fondo

Sottraendo il contributo del fondo al conteggio lordo fornito dalla scheda multicanale come integrazione dei conteggi accumulati nel tempo di acquisizione sulla ROI selezionata, si ottiene il valore del conteggio netto da impiegare nel calcolo della concentrazione di radon.

Per ottenere una stima del fondo si è proceduto alla misura dell'acqua rimasta stagnante per un mese nel contenitore da 40 l al fine di assicurarsi che tutto il radon in essa contenuto fosse decaduto.

Dalle 16 misure protrattesi dal 2/9 al 5/9, riportate in tabella 2.4 e figura 2.7, si è ricavato un valore medio del fondo pari a 17018 conteggi ( $T_{\text{conteggio}} = 60 \text{ min}$ ) integrando su una ROI che si estende dal picco del  $^{214}\text{Pb}$  a 242 keV fino ad una decina di canali oltre il picco del  $^{214}\text{Bi}$  a 609 : ciò per cautelarsi in caso di derive elettroniche del segnale.

Si è quindi ricavato il valore medio del fondo che è lo stimatore del valore atteso della distribuzione. Tuttavia non si conosce direttamente la deviazione standard della distribuzione da cui provengono le misure, infatti sarebbe troppo complesso un suo calcolo applicando la propagazione degli errori e comunque vi sarebbero fattori la cui influenza non è possibile quantificare.

Si calcola allora lo scarto quadratico medio, stimatore della varianza:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2$$

essendo :

**n** il numero delle misure eseguite ;

**$x_i$**  il valore di ogni misura ;

**$x_m$**  il valore medio

Lo scarto quadratico medio, stimatore della varianza, pertanto vale  $s^2 = 12021$

Per ottenere la valutazione dell'errore tramite lo scarto quadratico medio bisogna quindi determinare il fattore t dalla distribuzione di Student.

Scegliendo un valore per l'intervallo di confidenza del 68 % e considerando che  $v = n-1 = 15$  si ricava dalle tavole dei percentili il valore  $t^* = 1.042$ , con il quale l'errore è così valutato :

$$e = \pm t^* \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \cong 29$$

Si può dunque concludere che il valore del fondo F risulta :

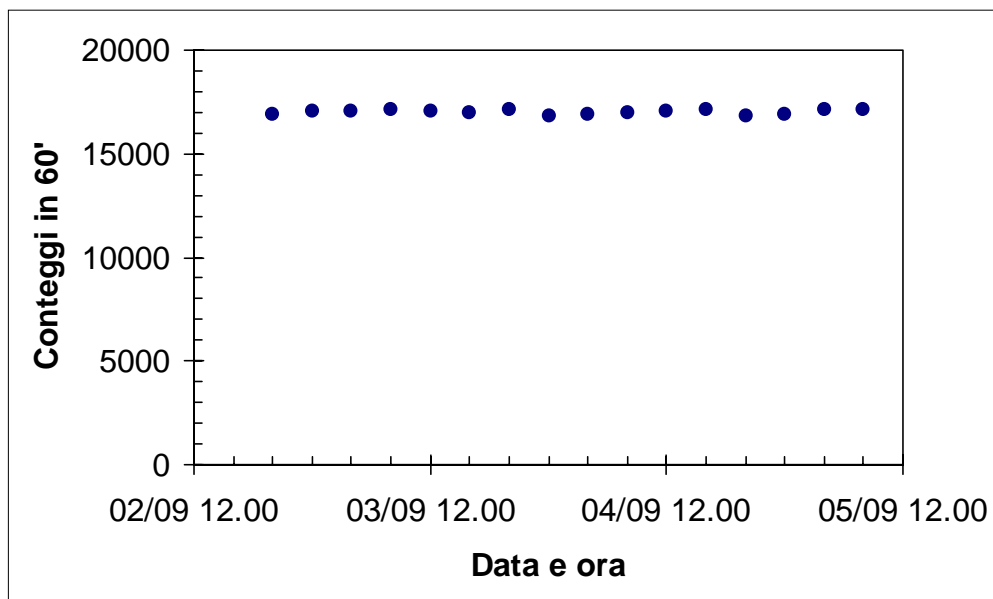
$$F = 17018 \pm 29$$

al livello di confidenza del 68 % ( $1\sigma$ ).

Data e ora	Conteggi
02/09 20.00	16902
03/09 0.00	17038
03/09 4.00	17101
03/09 8.00	17106
03/09 12.00	17054
03/09 16.00	17010
03/09 20.00	17138
04/09 0.00	16845
04/09 4.00	16928
04/09 8.00	16970
04/09 12.00	17069
04/09 16.00	17129
04/09 20.00	16820
05/09 0.00	16902
05/09 4.00	17119
05/09 8.00	17152

<i><b>Analisi statistica</b></i>	
Media	17018
Errore standard	27
Mediana	17046
Deviazione standard	110
Varianza campionaria	12021
Asimmetria	-0,5064
Intervallo	332
Minimo	16820
Massimo	17152
Somma	272283
Conteggio	16
Livello di confidenza (68,62%)	29

**Tabella 2.4** - Analisi statistica relativa ai conteggi di fondo



**Figura 2.7** - Andamento dei conteggi di fondo

## 2.7. Calibrazione del sistema $\gamma$

Per calibrare il sistema  $\gamma$  dotato di un beaker Marinelli da 0.69 l si è spillata in parallelo acqua arricchita di radon dal contenitore da 40 l anche in un beaker Marinelli da 0.95 l ; dalla misura di quest'ultimo nello spettrometro  $\gamma$  in cui è stato calibrato si è risaliti indirettamente alla concentrazione di radon nel beaker Marinelli da 0.69 l e quindi all'efficienza di conteggio del sistema  $\gamma$  di acquisizione in “quasi continuo”.

### 2.7.1. Valutazione dell'efficienza, della MDA e del rapporto segnale/rumore

Il beaker Marinelli da 0.95 l contenente acqua arricchita di radon è stato misurato per un tempo pari a 15' nello spettrometro  $\gamma$  a basso fondo con scintillatore a NaI(Tl) da 3'' $\times$ 3'' in dotazione al laboratorio di Radioprotezione Fisica del Dipartimento di Ingegneria Nucleare e Conversioni di Energia ; i conteggi netti ottenuti integrando lo spettro acquisito dall'analizzatore multicanale su una ROI comprendente i picchi a 295 e 352 keV del  $^{214}\text{Pb}$  e il picco a 609 keV del  $^{214}\text{Bi}$  sono

$$C_{\text{netti}} = 22735 \pm 165$$

essendo il fondo di 2257 conteggi ed avendo applicato la propagazione degli errori ad un fenomeno governato dalla distribuzione di Poisson; poiché l'efficienza del beaker Marinelli da 0.95 l per misure effettuate con lo spettrometro sopracitato è nota [8] e pari a

$$\text{Eff}_{\text{cont}} = 4.674 \pm 0.108 \text{ cpm/Bq l}^{-1}$$

la concentrazione di radon nel beaker e lo stimatore della sua deviazione standard valgono

$$C_{\text{Rn}} = \frac{C_{\text{netti}}}{\text{Eff}_{\text{cont}} \cdot T_{\text{cont}}} = \frac{22735}{4.674 \cdot 15} \cong 324 \text{ Bq/l}$$

$$\sigma_{\text{conc}} = C_{\text{Rn}} \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\text{netti}}}{C_{\text{netti}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\text{Eff}}}{\text{Eff}_{\text{cont}}}\right)^2} \cong 324 \sqrt{\left(\frac{165}{22735}\right)^2 + \left(\frac{0.108}{4.674}\right)^2} \cong 8 \text{ Bq/l}$$

La stessa concentrazione di radon è presente nel beaker Marinelli da 0.69 l del sistema  $\gamma$  nello stesso intervallo di tempo. Dal conteggio lordo in 1<sup>h</sup> fornito dalla scheda multicanale su una ROI che va dal picco del  $^{214}\text{Pb}$  a 242 keV al picco del  $^{214}\text{Bi}$  a 609 keV nell'intorno dell'intervallo di tempo considerato, utilizzando il valore del fondo in § 2.6 ed applicando la propagazione degli errori si ottiene :

$$C_{\text{netti}} = 59628 \pm 278$$

e pertanto

$$\text{Eff} = \frac{C_{\text{netti}}}{C_{\text{Rn}} \cdot T_{\text{acquisizione}}} = \frac{59628}{324 \cdot 60} \cong 3.065 \text{ cpm/Bq l}^{-1}$$

$$\sigma_{\text{Eff}} = \text{Eff} \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\text{netti}}}{C_{\text{netti}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\text{conc}}}{C_{\text{Rn}}}\right)^2} \cong 0.076 \text{ cpm/Bq l}^{-1}$$



Inoltre, per il limite inferiore di rivelazione (LLD), la minima attività rivelabile (MDA) ed il rapporto segnale/disturbo valgono le relazioni seguenti :

$$LLD = 3 \cdot \frac{\sqrt{F}}{T_{\text{acquisizione}}} \cong 6.52 \text{ cpm}$$

$$\sigma_{LLD} = \frac{3}{T_{\text{acquisizione}}} \sqrt{\frac{1}{4F}} \cdot \sigma_F \cong 0.01 \text{ cpm}$$

$$MDA = \frac{LLD}{\text{Eff}} \cong 2.13 \text{ Bq/l}$$

$$\sigma_{MDA} = MDA \sqrt{\left(\frac{\sigma_{LLD}}{LLD}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\text{Eff}}}{\text{Eff}}\right)^2} \cong 0.05 \text{ Bq/l}$$





$$R_{S/N} = \frac{C_{\text{netti}}}{\sqrt{F}} = \frac{59628}{\sqrt{17018}} \cong 457.1$$

$$\sigma_{S/N} = \sqrt{\frac{\sigma_{\text{netti}}^2}{F} + \frac{C_{\text{netti}}^2}{4F^3} \sigma_F^2} \cong 2.2$$

### 2.7.2. Scelta del tempo di acquisizione e della ROI

Lo spettro acquisito dalla scheda multicanale, utilizzato per calibrare il sistema  $\gamma$  di monitoraggio, è stato altresì elaborato per valutare il rapporto segnale/rumore e la MDA in funzione del tempo di acquisizione e della ROI selezionata. Poiché si dovrebbe poter discriminare valori di concentrazione di radon in acqua dell'ordine di  $5 \div 10 \text{ Bq/l}$  si è optato per un tempo di acquisizione pari a 60' (si veda la tabella 2.5). Tempi di acquisizione maggiori sebbene comportino un vantaggio in termini di MDA, di fatto precluderebbero la possibilità di effettuare cicli ogni 4 ore.

Dall'analisi dei dati in tabella 2.5, tenendo presente che in caso di funzionamento prolungato del sistema di monitoraggio si potrebbero verificare derive della catena elettronica con conseguente spostamento dello spettro, si ritiene opportuno utilizzare la ROI che si estende dal picco del  $^{214}\text{Pb}$  a 242 keV al picco del  $^{214}\text{Bi}$  a 609 keV.

	Region Of Interest			
				
<b>Conteggi lordi</b>	76646 ± 277	62526 ± 250	48954 ± 221	12238 ± 111
<b>Fondo</b>	17018 ± 29	14211 ± 26	8299 ± 17	2496 ± 16
<b>Conteggi netti</b>	59628 ± 278	48315 ± 251	40655 ± 222	9742 ± 112
<b>Efficienza (cpm/Bq l<sup>-1</sup>)</b>	3.065 ± 0.076	2.483 ± 0.061	2.090 ± 0.052	0.501 ± 0.013
<b>Rapporto Segnale/Rumore</b>	457.1 ± 2.2	405.3 ± 2.1	446.3 ± 2.5	195.0 ± 2.3
<b>LLD (cpm)</b>	6.52 ± 0.01	5.96 ± 0.01	4.55 ± 0.01	2.50 ± 0.01
<b>MDA (Bq/l)</b>	2.13 ± 0.05	2.400 ± 0.059	2.180 ± 0.054	4.989 ± 0.135

**Tabella 2.5** - Parametri caratteristici della risposta in 60' del sistema di monitoraggio per varie ROI

## 2.8. Calcolo della concentrazione di radon in acqua

Integrando sulla ROI preselezionata lo spettro acquisito si ottiene il valore dei conteggi lordi da utilizzare nel calcolo della concentrazione di radon in acqua secondo la relazione :

$$C_{Rn} = \frac{Cont_{lordi} - Cont_{fondo}}{K \cdot DF \cdot Eff \cdot T_{acquisizione}}$$

in cui

$Cont_{fondo}$  è il valore del fondo determinato secondo la procedura in § 2.6 ;

$K$  è un fattore che tiene conto del mancato raggiungimento dell'equilibrio secolare tra il radon ed i suoi figli a breve  $T_{1/2}$  ;

$DF = e^{-\frac{\Delta t}{\tau_{Rn}}}$  è un fattore che tiene conto del decadimento del radon nell'intervallo di tempo  $\Delta t$  compreso tra l'istante di campionamento e quello di acquisizione ;

$Eff$  è l'efficienza di conteggio, espressa in cpm/Bq l<sup>-1</sup> (Cfr. § 2.7.1) ;

$T_{acquisizione}$  è il tempo di acquisizione

## 2.9. Stabilità nel tempo della risposta del sistema

Dall'analisi degli spettri acquisiti durante i vari cicli di misura è emersa una leggera compressione dello spettro acquisito (figura 2.8), valutabile in una decina di canali, probabilmente imputabile alla scheda multicanale utilizzata. Dagli spettri mostrati, rappresentativi di acquisizioni effettuate a distanza di circa due mesi, si può dedurre quanto segue :

$C_{\text{lordi}} = 76846$  dallo spettro di settembre integrando sulla ROI definita a luglio (canali  $58 \div 170$ ) in occasione della calibrazione del sistema

$C_{\text{lordi}} = 80083$  dallo spettro di settembre integrando su una ROI modificata (canali  $54 \div 160$ ) in modo tale da estendersi sulla stessa porzione dello spettro di luglio interessata dalla ROI originale.

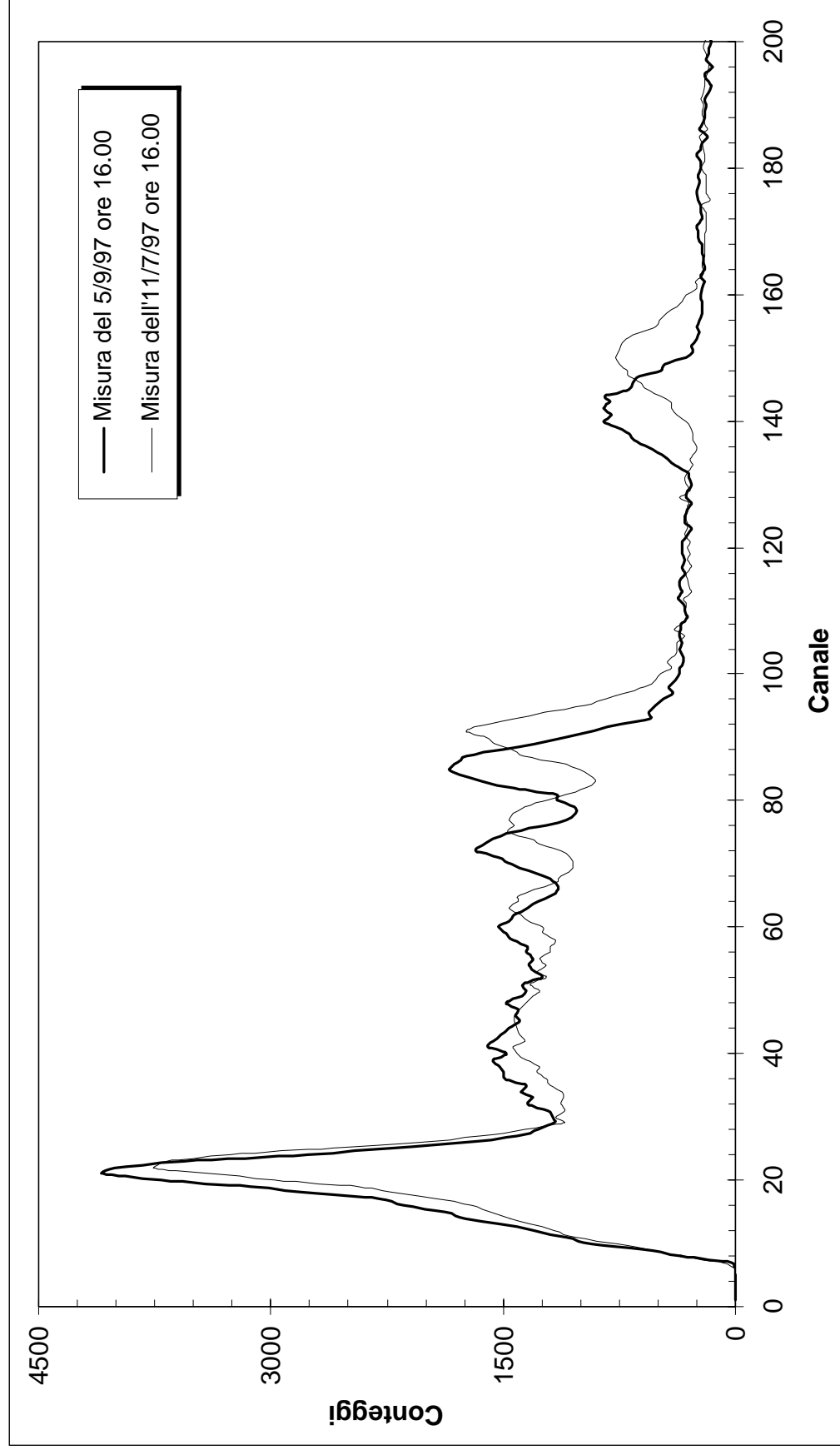
Si tenga presente che il contenuto dei canali immediatamente a sinistra della ROI è dell'ordine di circa 1400 conteggi, mentre a destra della ROI è dell'ordine di circa 220 conteggi.

Si può calcolare pertanto una perdita di conteggi del 3% circa :

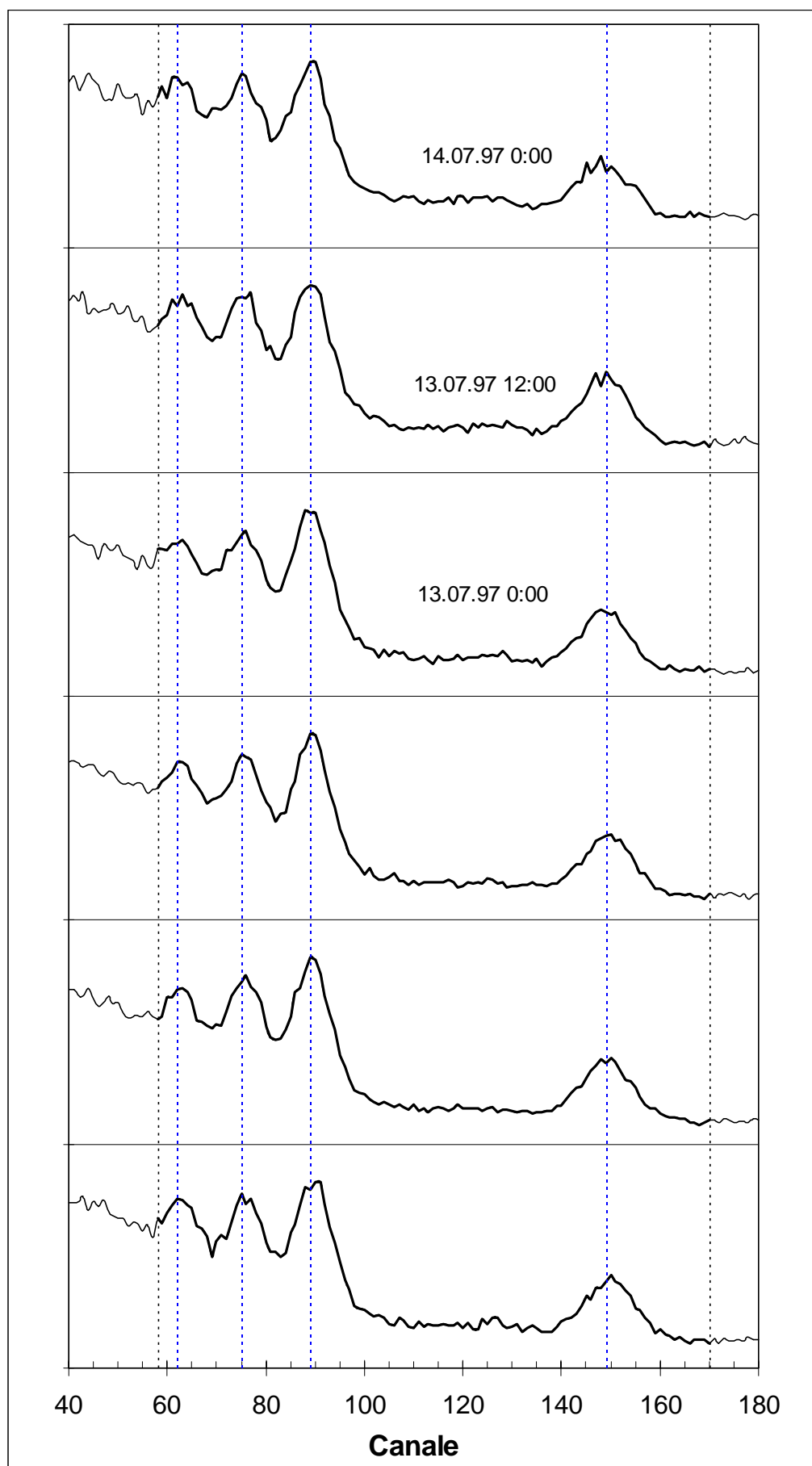
$$\frac{80083 - 76846}{80083} \cdot 100 \cong 3$$

La mancanza di stabilità nella risposta non è comunque rilevante qualora si considerino gli spettri acquisiti nel corso di uno stesso ciclo che non si protragga troppo a lungo, come si può osservare dalla figura 2.9 in cui sono raffigurati alcuni spettri acquisiti nel corso di un ciclo di misura, normalizzati ad un valore prefissato. Si può notare un'ottima stabilità della posizione dei picchi  $\gamma$ .

Da quanto esposto si avverte la necessità di procedere ad una periodica verifica della calibrazione del sistema qualora non si intervenga nel migliorare la stabilità della catena di misura.



**Figura 2.8** - Evidenza dell'assenza di stabilità nella risposta del sistema dal confronto di spettri acquisiti a distanza di circa due mesi



**Figura 2.9** - Spettri acquisiti nel corso del terzo ciclo di misure.  
Si evidenzia un'ottima stabilità nella risposta del sistema

## **2.10. Scelta del sito ove ubicare il sistema di monitoraggio**

Il sito in cui dovrà essere installato il sistema di monitoraggio della concentrazione di radon in acqua dovrà garantire i seguenti requisiti :

- *facile accessibilità*, al fine di agevolare il compito del personale che periodicamente dovrà prelevare i dati acquisiti e controllare il corretto funzionamento del sistema ;
- *disponibilità di alimentazione elettrica*, necessaria per l'alimentazione della strumentazione elettronica e del PC ove è installata la scheda multicanale di acquisizione ;
- *presenza di personale*, al fine di ricevere segnalazioni tempestive in caso di interruzione della fornitura idrica o elettrica ;
- *concentrazione di radon in acqua sufficientemente elevata*, ciò consente un collaudo prolungato del sistema in condizioni di buona statistica.

In seguito a vari sopralluoghi nel comprensorio dei Castelli Romani un sito che soddisfa i requisiti di cui sopra è stato individuato in un locale del Centro ENEA di Frascati: è infatti disponibile acqua a concentrazione di radon superiore ai 200 Bq/l prelevata da un pozzo che in passato è servito per la refrigerazione del sincrotrone.

Tra i materiali che l'acqua attraversa prima di giungere in superficie si sottolinea la presenza di tufo, anche mescolato con altri materiali, e di strati lavici.

### **3. Misura “in continuo” della concentrazione di radon in acqua mediante cella a scintillazione o spettroscopia $\gamma$**

#### **3.1. Cenni sulle tecniche di rivelazione adottate**

Dopo aver studiato la risposta del sistema  $\gamma$  di monitoraggio della concentrazione di radon in acqua proposto nel capitolo 2 si è voluto intraprendere lo sviluppo di un analogo sistema al fine di migliorare parametri quali sensibilità e MDA. Si è altresì ricercata maggiore leggerezza del sistema nel suo complesso, evitando l'impiego di schermi in piombo, ed una maggiore semplicità del sistema di acquisizione rendendo possibile l'utilizzo di scale conteggio in luogo di analizzatori multicanale.

Si è optato per un sistema in cui si ha il trasferimento in un volume che ospita una cella a scintillazione del radon contenuto nel campione d'acqua da analizzare : l'integrale dei conteggi ottenuti su tutto lo spettro prodotto dalla rivelazione delle  $\alpha$  emesse dal  $^{222}\text{Rn}$  e dai suoi figli, previa calibrazione, è indicativo del valore della concentrazione di radon in acqua.

Lo spettro ottenuto è uno spettro continuo non correlato all'energia delle  $\alpha$  emesse ; pertanto, anche se memorizzato, potrebbe non consentire l'identificazione di eventuali anomalie sui conteggi dovute ad esempio a variazioni di soglia, sbalzi temporanei della tensione di alimentazione e ad effetti di saturazione della strumentazione elettronica. Ai fini della verifica dell'affidabilità del sistema  $\alpha$  si è quindi ritenuto opportuno affiancargli il sistema di monitoraggio  $\gamma$  descritto nel capitolo 2 che, operando su un campione d'acqua praticamente identico, genera uno spettro in cui eventuali anomalie sono facilmente identificabili.

Intuitivamente, per quanto riguarda la tecnica  $\alpha$ , si dovrà prevedere il prelievo del campione d'acqua da monitorare ed il suo successivo degassamento; il gas estratto, ricco di radon, dovrà rimanere in attesa per circa 3 ore, tempo nel quale si stabilisce l'equilibrio del radon con i suoi figli a breve  $T_{1/2}$ . Seguirà poi la misura ed infine il ricambio dell'acqua



depleta nel beaker di campionamento e del gas nel volume che ospita la cella di Lucas prima di ripetere un nuovo ciclo. Il ricambio dell'acqua può essere ottenuto attraverso svuotamento e successivo riempimento, oppure tramite ricircolo di un numero di volumi di acqua sufficienti al completo rinnovo. La sequenza appena descritta, da ripetere ciclicamente, sarà resa automatica.

I principali componenti idraulici, elettrici ed elettronici del sistema proposto ed i relativi parametri di progetto verranno discussi nei paragrafi seguenti [9].

### **3.2. Cella a scintillazione**

Un dispositivo attivo comunemente usato per la rivelazione del  $^{222}\text{Rn}$  e dei suoi figli  $\alpha$  emettitori è la cella a scintillazione, anche nota come cella di Lucas.

La cella a scintillazione è costituita da una camera di volume compreso tra i 100 e i 1500 cm<sup>3</sup>, con pareti interne rivestite di solfuro di zinco (ZnS(Ag)), scintillatore ad elevata efficienza.

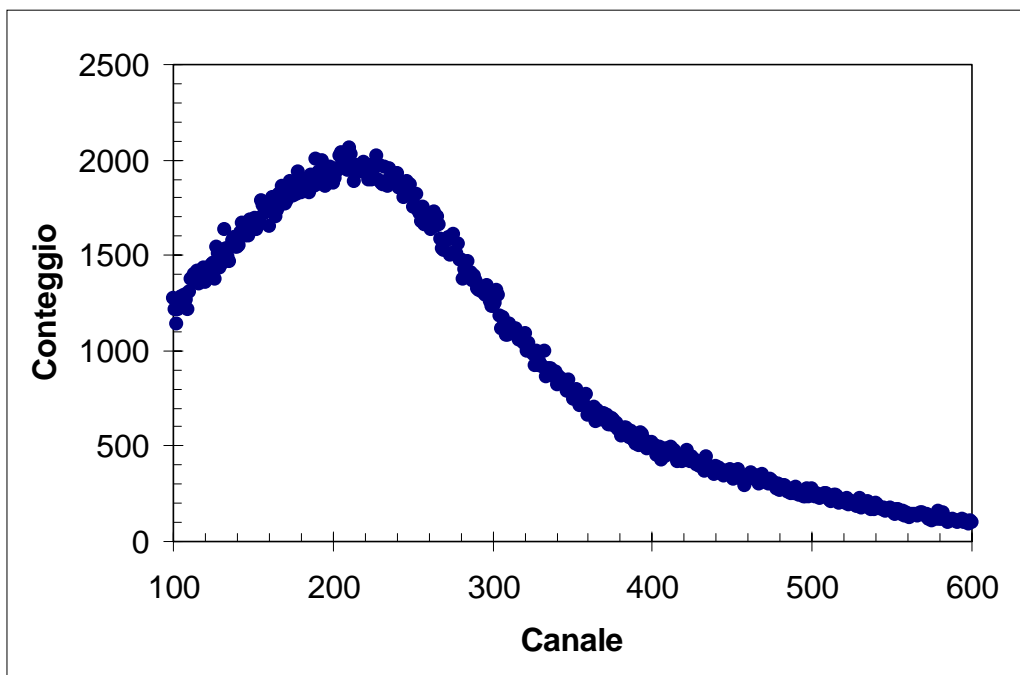
Lo spessore del materiale di rivestimento, uno strato sottilissimo (dell'ordine di 10 ÷ 15 mg/cm<sup>2</sup>) superiore al range delle particelle  $\alpha$ , può essere ottenuto assai semplicemente “verniciando” le pareti della cella con una sospensione di polvere di solfuro di zinco in liquido colloso. Si tenga presente che il range delle particelle  $\alpha$  in seno allo scintillatore è piccolissimo (pochi micron per energie di qualche MeV).

Il sottile strato permette altresì di discriminare le particelle  $\alpha$  da altre radiazioni maggiormente penetranti, quali le radiazioni  $\gamma$  e  $\beta$ .

La cella di Lucas è costituita da una camera di vetro, metallo o plexiglas e presenta penetrazioni per l'ingresso dell'aria da un lato, permettendo l'accoppiamento con un fotomoltiplicatore dall'altro : tale sistema deve essere ovviamente a prova di luce.

La configurazione geometrica influisce sulla risposta del sistema ; la cella da noi utilizzata è cilindrica con un diametro ed un'altezza di 8 cm.

Il tipico spettro ottenibile, mostrato in figura 3.1, dimostra chiaramente l'impossibilità di discriminare l'energia delle particelle  $\alpha$  rivelate.



**Figura 3.1** - Tipico spettro  $\alpha$  ottenibile con una cella a scintillazione

Come già anticipato, la cella di Lucas è utilizzata per rivelare le  $\alpha$  di decadimento del  $^{222}\text{Rn}$ , del  $^{218}\text{Po}$  e del  $^{214}\text{Po}$ ; il segnale di fondo cresce nel tempo a causa dell'accumulo del  $^{210}\text{Po}$  sulle pareti della cella: si tenga presente che il segnale utile deriva in maniera preponderante dai decadimenti del  $^{218}\text{Po}$  e del  $^{214}\text{Po}$  che hanno aderito allo strato di solfuro di zinco. Per la concentrazione di radon  $C_{\text{Rn}}$  vale la relazione :

$$C_{\text{Rn}} = \frac{K \cdot C_{\text{netti}}}{T_{\text{acq}} \cdot \text{Eff}_{\text{cont}}}$$

in cui

$C_{\text{netti}}$  sono i conteggi netti ottenuti nel tempo di acquisizione selezionato ( $T_{\text{acq}}$ ) ;

$\text{Eff}_{\text{cont}}$  è l'efficienza di conteggio, espressa in  $\text{cpm}/\text{Bq m}^{-3}$  ;

$K$  è un fattore di correzione per il decadimento del radon ed il mancato raggiungimento dell'equilibrio secolare : questo termine è trascurabile (a meno del 3%) per tempi di attesa  $t_a > 3^h$ , dove  $t_a = t_{\text{inizio acquisizione}} - t_{\text{immissione Rn}}$  .

### 3.3. Dispositivo per il trasferimento nel volume di misura del radon contenuto in un campione di acqua

Il sistema impiegato è mostrato in figura 3.2.

In basso si può notare il volume di campionamento dell'acqua da degassare, costituito da tre parti in plexiglass opportunamente sagomate e mantenute unite mediante aste filettate ; nel seguito ci si riferirà ad esso con il termine *beaker*. La tenuta è garantita dall'utilizzo di o-rings.

In alto vi è un cilindro in PVC ; il coperchio è attraversato dal fotomoltiplicatore (sono visibili le connessioni per il partitore di tensione) il cui fotocatodo è affacciato alla cella a scintillazione. Questa è solidale al coperchio del cilindro in PVC tramite una corona metallica, dadi e aste filettate. Un apposito supporto impedisce che il fotomoltiplicatore possa muoversi verso l'interno del cilindro.

Aste filettate e dadi consentono il serraggio del coperchio verso la base, realizzando la tenuta mediante l'impiego di o-rings.

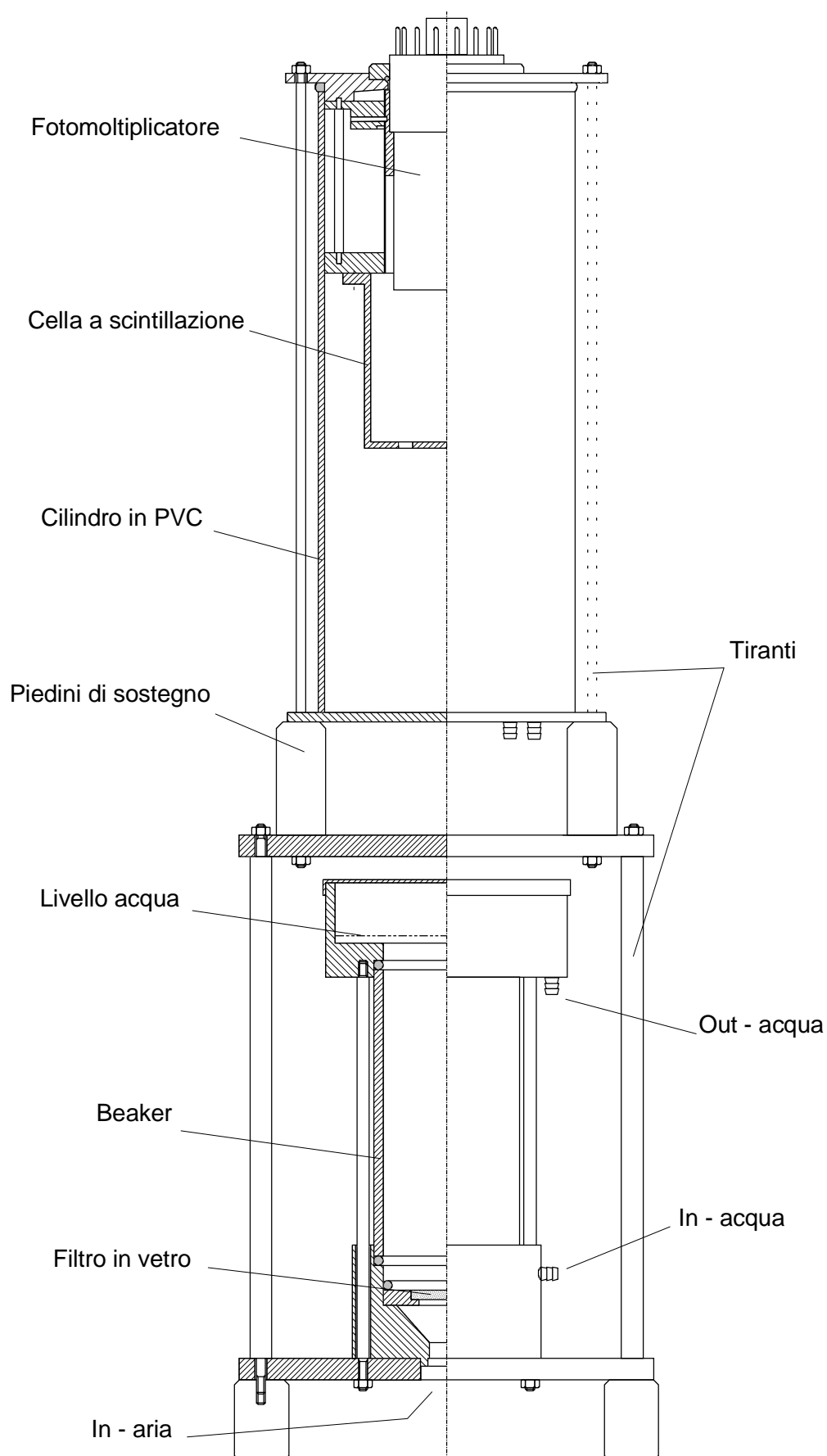
Il prelievo del campione di acqua avviene per gravità : la riserva di acqua arricchita (si veda il § 2.3) è infatti posta in quota rispetto al beaker il cui riempimento, che avviene dal basso, è limitato dalla quota del bocchello di svuotamento.

Il degassamento dell'acqua avviene per gorgogliamento dell'aria che l'attraversa. Nel cilindro in PVC viene dapprima raggiunto un determinato grado di vuoto, successivamente viene messo in comunicazione tramite un tubo in gomma intercettato da un'elettrovalvola e da un'ampolla in vetro con il beaker che si trova a pressione atmosferica in quanto comunica con l'ambiente esterno attraverso una valvola a spillo il cui condotto penetra dal fondo del beaker stesso. Per effetto della differenza di pressione l'aria attraversa la valvola a spillo, entra dal fondo del beaker ove incontra un filtro di vetro che la fraziona e gorgoglia nell'acqua degassandola ; l'aria così arricchita riempie quindi il cilindro in PVC fino all'equilibrio delle pressioni.

L'ampolla di vetro a valle del beaker, in serie con un'elettrovalvola, ha la funzione di impedire che goccioline di acqua possano raggiungere il cilindro in PVC e quindi

- deteriorare lo strato di solfuro di zinco con cui è rivestita la cella a scintillazione ;
- mantenere l'aria in condizioni di saturazione con conseguente rischio di condensa sulle pareti del fotomoltiplicatore.

**Figura 3.2 - Schema del sistema di campionamento**



Tale fenomeno di trasporto è particolarmente accentuato all'inizio del degassamento a causa del forte salto di pressione.

Il ricircolo di aria e il vuoto vengono ottenuti tramite una pompa per mezzo di apposite penetrazioni situate sul fondo del cilindro in PVC. Per realizzare il ricircolo di aria in maniera più efficiente (è importante cautelarsi da possibili 'effetti memoria' tra cicli contigui) il rientro dell'aria avviene in prossimità della sommità del cilindro, mentre la pompa aspira dal basso.

### ***3.3.1. Determinazione delle perdite di carico del sistema $\alpha$***

È utile valutare l'entità delle perdite di carico lungo il circuito idraulico (contenitore - beaker e beaker - scarico). Scrivendo l'equazione di Bernoulli tra la sezione del circuito idraulico in corrispondenza del pelo libero dell'acqua nel contenitore da 40 l (pedice A) e quella in corrispondenza dello scarico dell'acqua (pedice O) si ha :

$$\frac{p_A}{\gamma} + \frac{v_A^2}{2g} + z_A = \frac{p_O}{\gamma} + \frac{v_O^2}{2g} + z_O + R_{A,O}$$

da cui, essendo  $p_A = p_O$ , si ottiene :

$$\frac{v_A^2}{2g} + z_A = \frac{v_O^2}{2g} + z_O + R_{A,O}$$

Poiché la sezione del tubo attraverso cui l'acqua fluisce è piccola ( $\phi 4$  mm), la velocità di discesa del pelo libero nella riserva d'acqua è trascurabile e pertanto lo è il termine cinetico a primo membro dell'eq. di Bernoulli che può essere ulteriormente semplificata :

$$z_A - z_O = \frac{v_O^2}{2g} + R_{A,O}$$

La velocità di scarico è legata alla portata (funzione della quota  $z_A$ ) dalla relazione seguente :

$$v_O = \frac{Q(z_A)}{A_O} \text{ m/s}$$

pertanto si ottiene :

$$z_A - z_O = \frac{Q^2(z_A)}{2 g A_O^2} \left( 1 + \sum_i k_i + f_M \frac{L}{D} \right)$$

$$Q(z_A) = A_O \sqrt{\frac{2 g (z_A - z_O)}{1 + \sum_i k_i + f_M \frac{L}{D}}}$$

ove

$$A_O = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi \cdot (4 \cdot 10^{-3})^2}{4} \cong 1.26 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2;$$

$\sum_i k_i$  è la somma dei coefficienti per il calcolo delle perdite di carico concentrate in corrispondenza delle curvature della tubazione, dell'elettrovalvola EV<sub>1</sub> e dei cambiamenti di sezione ;

$f_M$  è il coefficiente di attrito della tubazione (perdita di carico distribuita) ;

$L \cong 4 \text{ m}$ , è la lunghezza della tubazione ;

$D = 4 \text{ mm}$ , è il diametro della tubazione ;

$g = 9.81 \text{ m/s}^2$

I coefficienti per il calcolo delle perdite di carico sono stati ricavati sperimentalmente misurando la portata in corrispondenza di una certa quota (media) del pelo libero dell'acqua arricchita nel contenitore da 40 l. La quota di scarico è  $z_O \cong 0.2 \text{ m}$ . Con il contenitore pieno 2 l di acqua fluiscono in  $\sim 87 \text{ s}$  ( $Q \cong 2.3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ ) e la quota del pelo libero è  $z_A \cong 2.3 \text{ m}$ . Pertanto si ottiene :

$$\sum_i k_i + f_M \frac{L}{D} = \frac{2 g A_O^2 (z_A - z_O)}{Q^2(z_A)} - 1 = \frac{2 \cdot 9.81 \cdot (1.26 \cdot 10^{-5})^2 \cdot 2.1}{(2.3 \cdot 10^{-5})^2} - 1 \cong 11.4$$

Tale dato è stato verificato a contenitore quasi vuoto ottenendo :

$$\sum_i k_i + f_M \frac{L}{D} = \frac{2 g A_O^2 (z_A - z_O)}{Q^2(z_A)} - 1 = \frac{2 \cdot 9.81 \cdot (1.26 \cdot 10^{-5})^2 \cdot 1.8}{(2.06 \cdot 10^{-5})^2} - 1 \cong 12.2$$

I due valori sono in buon accordo, tenendo conto delle semplificazioni e delle approssimazioni introdotte. Considerando il valor medio si ha :

$$\sum_i k_i + f_M \frac{L}{D} \cong 11.8$$

Ne consegue una perdita di carico media pari a :

$$R = \frac{\bar{v}^2}{2 \cdot g} \left( \sum_i k_i + f_M \frac{L}{D} \right) \cong \frac{1.73^2}{2 \cdot 9.81} \cdot 11.8 \cong 1.8 \text{ m}$$

### 3.4. Strumentazione elettronica per l'analisi del segnale

Il sistema elettronico ha il compito di processare il segnale prodotto dal rivelatore e trasferirlo ad una scheda multicanale installata su un personal computer.

Pertanto il primo elemento della catena sarà il rivelatore, costituito nel nostro caso da uno scintillatore a NaI(Tl) o da una cella di Lucas, fotomoltiplicatore e partitore di tensione ; seguiranno i circuiti per il trattamento dell'impulso di tensione prodotto, al fine di adattarlo al processamento ad opera della scheda analizzatore multicanale che lo classificherà in base alla sua ampiezza, correlata all'energia rilasciata dalla radiazione nel mezzo rivelante.

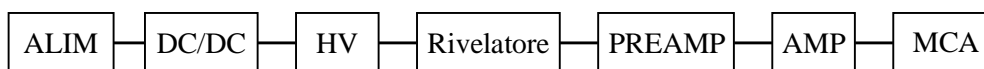
Gli impulsi prodotti dai rivelatori sono di ampiezza relativamente piccola ; occorre quindi procedere alla loro amplificazione massimizzando il valore del rapporto segnale/rumore.

Il sistema di amplificazione è spesso diviso in due parti : preamplificatore e amplificatore.

Il preamplificatore ha la funzione di irrobustire il segnale perché risenta poco degli effetti prodotti da fonti di disturbo, ottenendo un buon rapporto segnale/rumore, e di fornire una prima amplificazione. Il suo impiego è in genere visto come ‘adattatore di impedenza’ in relazione al massimo trasferimento del segnale considerato.

Il segnale di tipo analogico, amplificato in ampiezza ad opera dell’amplificatore, è inviato all’analizzatore multicanale<sup>1</sup>.

Segue lo schema generale del sistema di misura impiegato :



Il blocco ‘HV’, che fornisce l’alta tensione per l’alimentazione del rivelatore, riceve in ingresso una tensione stabilizzata dal convertitore ‘DC/DC’ : piccole oscillazioni della tensione in ingresso (12 V) al modulo di alta tensione si tradurrebbero infatti in oscillazioni della tensione in uscita inaccettabili ai fini della linearità della risposta della catena di rivelazione.

Nel paragrafo seguente ci si soffermerà sulla descrizione del partitore di tensione, in quanto realizzato in laboratorio.

### **3.4.1. Il partitore di tensione**

Bisogna applicare al fotomoltiplicatore una sorgente esterna di alta tensione in modo tale da fornire al fotocatodo e ai dinodi successivi il potenziale opportuno. Gli elettroni

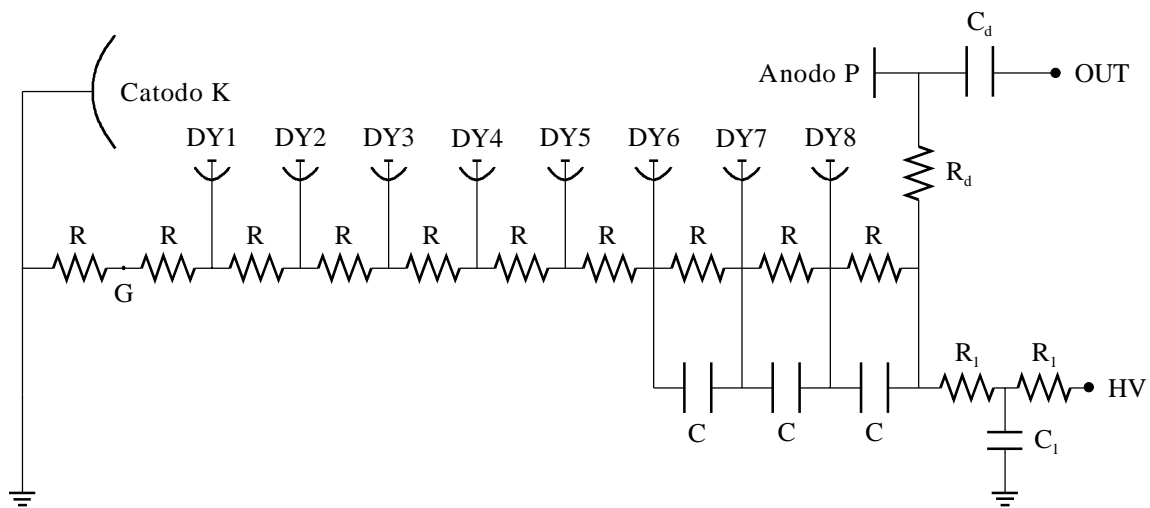
---

<sup>1</sup> Per l’analisi degli impulsi prodotti dalla cella di Lucas si può utilizzare, in vece dell’analizzatore multicanale, un sistema discriminatore-contatore nel quale si ha la trasformazione del segnale analogico in un impulso logico che poi viene contato.



devono essere attratti dai dinodi successivi ; è per questo che il primo dinodo deve trovarsi ad una tensione maggiore del fotocatodo ed ogni dinodo che segue deve essere a potenziale maggiore del precedente. Tale ‘distribuzione’ del potenziale si ottiene utilizzando un partitore di tensione ; in particolare l’alta tensione verrà applicata all’anodo mentre il fotocatodo verrà posto a massa.

Il partitore è formato dal collegamento in serie di resistenze di valore non troppo basso in modo tale da evitare eccessive dissipazioni per effetto Joule dovute a correnti troppo elevate. In figura 3.3 è mostrato lo sviluppo lineare dello schema elettrico del partitore adottato.



**Figura 3.3** - Schema elettrico del partitore di tensione

La separazione della componente continua dal segnale di interesse è ottenuta ponendo un condensatore di disaccoppiamento ( $C_d$ ) a valle dell’anodo.

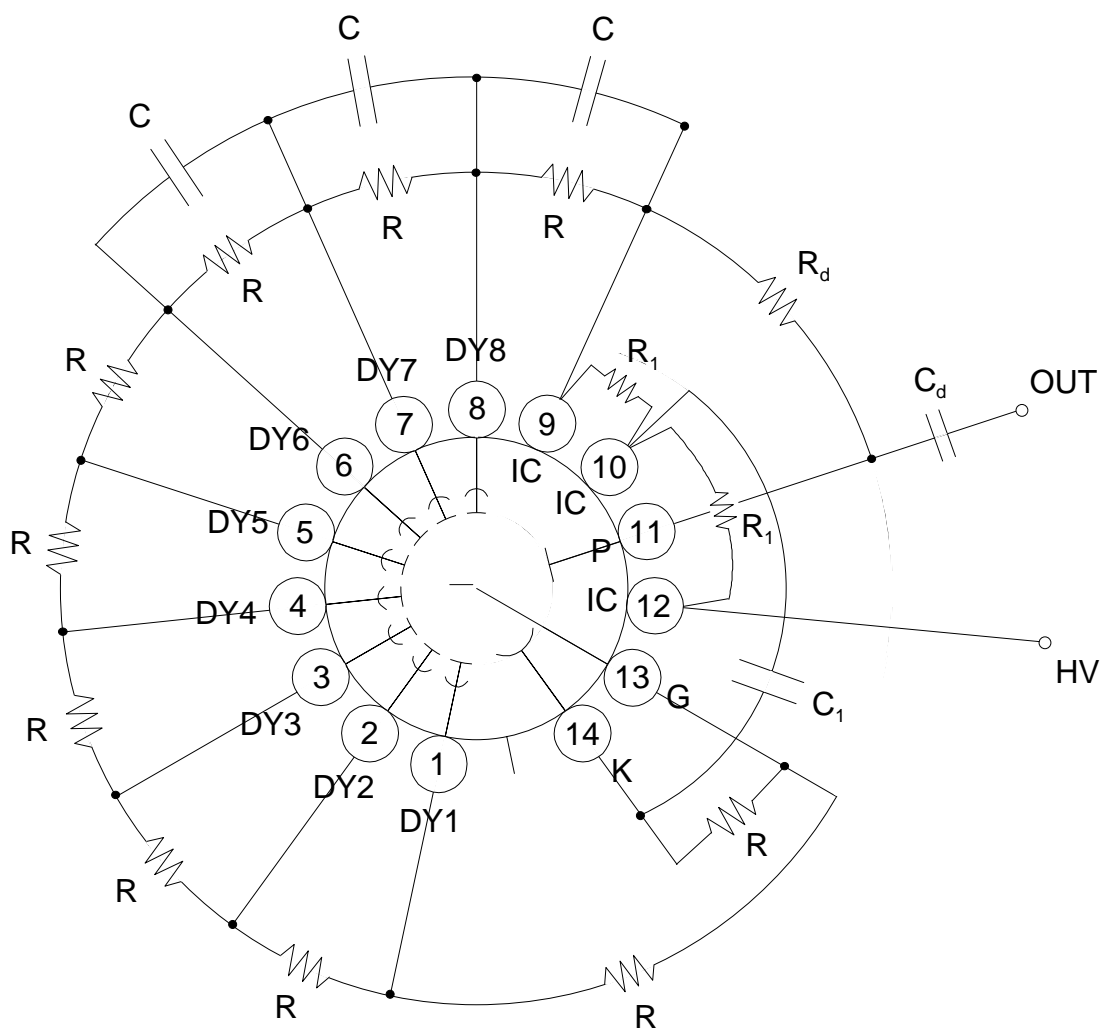
L’azione di moltiplicazione degli elettroni sottopone i dinodi a correnti differenziali. Ogni dinodo vede arrivare un certo numero di elettroni primari e ne restituisce un numero maggiore. Questa differenza di carica è riequilibrata dal circuito esterno ; ciò provoca cadute di tensione ai capi delle resistenze del partitore, il conseguente sbilanciamento dei potenziali compromette il buon funzionamento del fotomoltiplicatore.

È quindi opportuno mantenere i dinodi ad un valore di potenziale costante durante l’impulso ; pertanto vengono usualmente posti fra gli ultimi dinodi dei condensatori che

stabilizzano i potenziali, fornendo a proprie spese la carica necessaria che viene poi restituita dal partitore nell'intervallo di tempo che intercorre fino all'impulso successivo. È fondamentale l'uso di questi condensatori dove la corrente è maggiore: ossia in corrispondenza degli ultimi dinodi.

Perché il potenziale a cui si trova un dinodo vari per meno dell'1% in corrispondenza di un impulso, la carica immagazzinata sul corrispondente condensatore deve essere almeno 100 volte maggiore della carica emessa dal dinodo durante l'impulso.

Nella figura 3.4 è mostrato il layout del partitore di tensione realizzato.



**Figura 3.4** - Layout del partitore di tensione adottato

La resistenza  $R_d$  consente di trasformare il segnale in corrente disponibile all'anodo in un segnale di tensione.

Considerato il basso valore della corrente in uscita dall'anodo, la resistenza di carico che si usa è molto grande così da convertire un segnale di basso livello in corrente in un segnale di alto livello in tensione.

Tuttavia l'uso di un valore eccessivo della resistenza  $R_d$  provoca una forte caduta di tensione ai suoi capi causando una diminuzione della differenza di potenziale tra l'anodo e l'ultimo dinodo : questo causa una minore efficienza nell'azione di raccolta degli elettroni da parte dell'anodo. Si tenga presente che la risposta può andare in saturazione oltre certi valori di corrente determinando una perdita di linearità.

Per limitare forti transienti attraverso  $C_d$  occorre impedire una brusca salita dell'alta tensione all'atto dell'alimentazione del partitore di tensione e quindi del fotomoltiplicatore. Per questo motivo l'alta tensione è fornita tramite un circuito in configurazione di filtro passa basso, costituito dalle resistenze  $R_1$  e dal condensatore  $C_1$  verso massa.

Seguono le caratteristiche dei componenti utilizzati :

$$R = 220 \text{ k}\Omega$$

$$C = 0.01 \text{ }\mu\text{F}$$

$$R_d = 1 \text{ M}\Omega$$

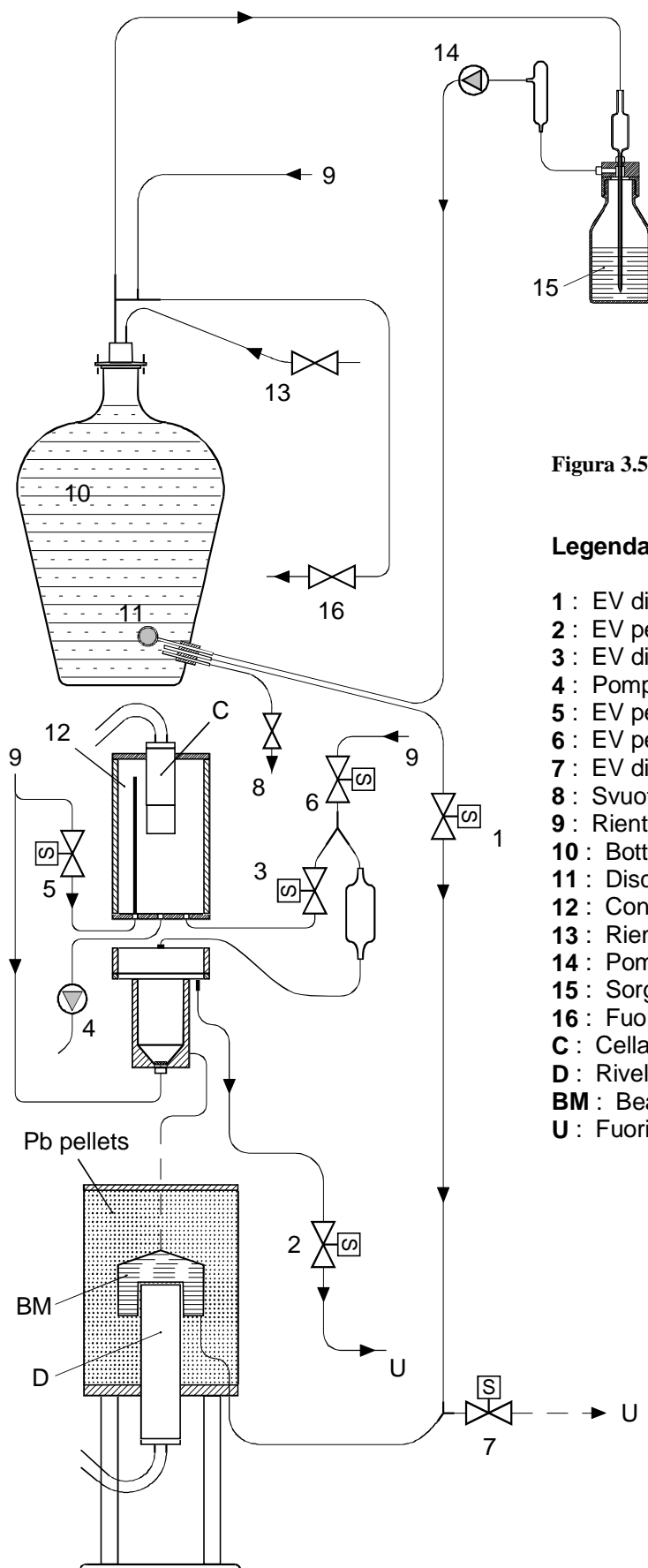
$$C_d = 470 \text{ pF}$$

$$R_1 = 47 \text{ k}\Omega$$

$$C_1 = 0.01 \text{ pF}$$

### **3.5. Monitoraggio della concentrazione di radon in acqua mediante tecniche $\alpha$ e $\gamma$**

Nel descrivere il funzionamento del sistema di monitoraggio 'in continuo' della concentrazione di radon in acqua si farà riferimento agli schemi del circuito idraulico, elettrico e alla logica di attuazione mostrati nelle figure 3.5, 3.6 e 3.7.

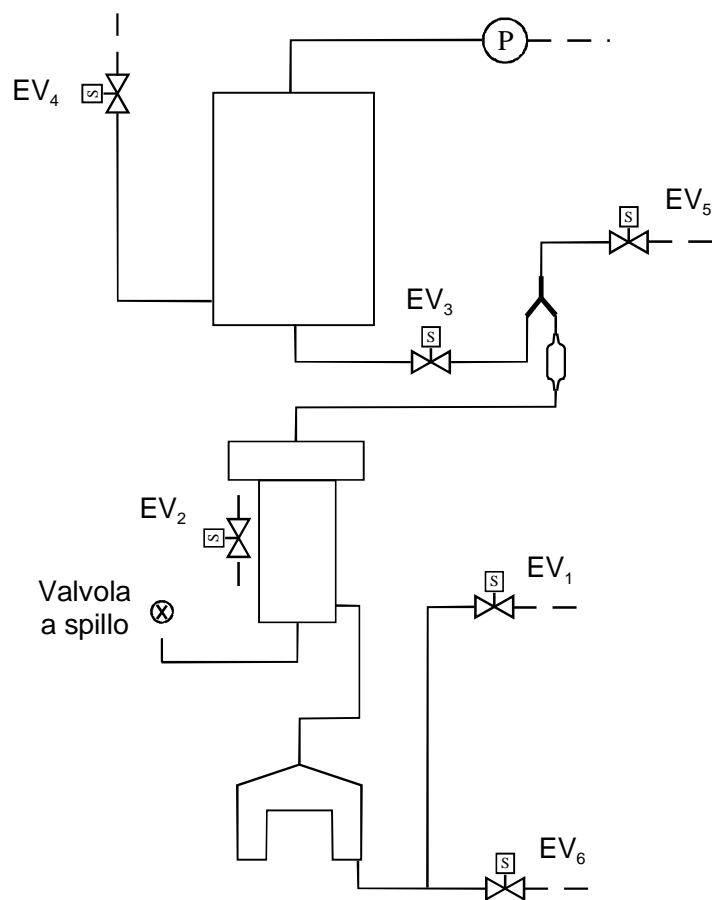
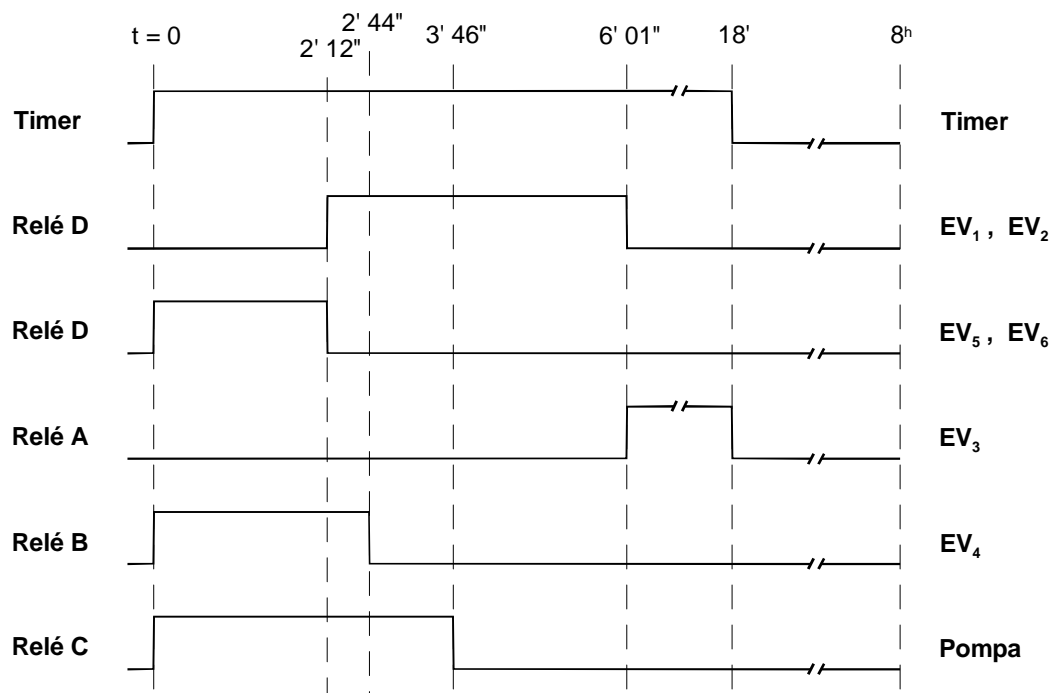


**Figura 3.5 - Schema idraulico**

### Legenda

- 1 : EV di riempimento
- 2 : EV per il ricambio di acqua
- 3 : EV di degassaggio
- 4 : Pompa da vuoto
- 5 : EV per il ricambio di aria
- 6 : EV per il rientro di aria
- 7 : EV di svuotamento
- 8 : Svuotamento o prelievo campione
- 9 : Rientro di aria dall'esterno
- 10 : Bottiglione (~ 40 l)
- 11 : Disco di vetro poroso
- 12 : Contenitore in PVC
- 13 : Riempimento del bottiglione
- 14 : Pompa
- 15 : Sorgente di radon
- 16 : Fuoriuscita di aria
- C : Cella di Lucas e fotomoltiplicatore
- D : Rivelatore a scintillazione
- BM : Beaker Marinelli 2"x2"
- U : Fuoriuscita di acqua

The diagram illustrates two electrical control systems. The left system features a 16 A 250 V AC power source connected to a switch labeled 'G'. This switch controls a series of four relays, labeled A, B, C, and D, which are also designated as EV<sub>1</sub>, EV<sub>2</sub>, EV<sub>3</sub>, and EV<sub>4</sub> respectively. Each relay has 11 terminals. Two DC voltage sources, 24 V and 12 V, are connected to the relays. The right system shows a similar 16 A 250 V AC source connected to a switch that controls two Catena units, labeled Catena α and Catena γ. These units are connected to a 12 V DC source and a 220 V AC source.



**Figura 3.7 - Logica di attuazione**

L'alimentazione è fornita da una coppia di batterie tampone da 12 V collegate in serie e da un caricabatterie collegato permanentemente alla rete a 220 VAC ; è resa disponibile sulla morsettiera dell'inseritore a tempo meccanico.

Nel momento in cui l'inseritore a tempo meccanico alimenta il circuito dei relé (cavalierini sollevati) vengono eccitati i solenoidi delle elettrovalvole EV<sub>4</sub>, EV<sub>5</sub> ed EV<sub>6</sub>, contemporaneamente è messa in funzione la pompa da vuoto. In questa fase si ha quindi il ricambio di aria nel cilindro in PVC (l'aria che rientra nel cilindro in PVC attraverso la tubazione che fa capo all'elettrovalvola EV<sub>4</sub> è aspirata dalla pompa ed espulsa) e lo svuotamento per gravità, all'apertura delle elettrovalvole EV<sub>5</sub> ed EV<sub>6</sub>, del beaker di campionamento del sistema  $\alpha$  e del beaker Marinelli del sistema  $\gamma$  : si provvede pertanto alla preparazione del successivo ciclo di misura eliminando ciò che è relativo al ciclo precedente. All'atto della commutazione del relé D si ha la chiusura delle elettrovalvole EV<sub>5</sub> ed EV<sub>6</sub> e la contemporanea apertura delle EV<sub>1</sub> ed EV<sub>2</sub> : ha inizio il riempimento dei beaker con acqua arricchita di radon contenuta nella sovrastante mariotta da 40 l. Successivamente, alla commutazione del relé B, viene chiusa l'elettrovalvola EV<sub>4</sub> e la pompa crea il vuoto nel cilindro in PVC finché non viene disalimentata dalla commutazione del relé C. Infine, dopo un congruo ricircolo dell'acqua nei beaker in modo che quella in essi rimasta non sia stata a contatto con l'aria (come inevitabilmente avviene durante la fase di riempimento), si ha la commutazione del relé A con la conseguente chiusura delle elettrovalvole EV<sub>1</sub> ed EV<sub>2</sub> e la contemporanea apertura dell'elettrovalvola EV<sub>3</sub> : in questa fase avviene quindi il degassamento dell'acqua contenuta nel beaker di campionamento del sistema  $\alpha$  ad opera dell'aria che rientra attraverso la tubazione che fa capo alla valvola a spillo ; l'aria così arricchita entra nel cilindro in PVC fino all'equilibrio delle pressioni ed è pronta ad essere misurata al raggiungimento dell'equilibrio secolare tra il radon ed i suoi figli a breve  $T_{1/2}$  in essa dispersi. L'elettrovalvola EV<sub>3</sub> viene chiusa quando alla successiva commutazione dell'inseritore a tempo meccanico il circuito dei relé viene disalimentato.

### ***3.5.1. Definizione dei tempi del ciclo***

Con la logica di attuazione adottata non esistono problemi di sincronismo per l'esecuzione delle varie operazioni. Infatti le fasi di svuotamento e successivo riempimento

dei beaker non possono sovrapporsi in quanto comandate dallo stesso relé (relé D) ; la pompa e l'elettrovalvola EV<sub>4</sub> di rientro dell'aria sono comandate indipendentemente e programmate opportunamente ; l'inizio del degassamento non può avvenire prima della fine del ricircolo dell'acqua nel beaker del sistema  $\alpha$  in quanto anche tali operazioni sono comandate dallo stesso relé (relé A) ; anche il termine della fase di vuoto, controllata dal relé C, può essere adeguatamente anticipato rispetto all'inizio del degassamento.

I tempi di esecuzione delle varie fasi sono stati scelti imponendo le seguenti condizioni :

- *evitare una scarica eccessiva delle batterie al piombo* : ciò ha comportato una limitazione sul tempo di funzionamento della pompa, il componente a maggiore assorbimento di potenza (circa 11 W), contenendo la durata della fase di ricambio di aria nel cilindro in PVC. Si tenga presente che il carica batterie, pur continuamente inserito nel circuito, è in grado di erogare soltanto il 20% della massima corrente richiesta (0.3 A su 1.46 A) durante le fasi più dispendiose che impegnano contemporaneamente 3 elettrovalvole e la pompa ;
- *il consumo di acqua per ciclo deve essere tale da consentire il funzionamento continuato del sistema di monitoraggio per 5 giorni, assumendo di compiere 3 cicli/giorno.*

conseguentemente, per i relé :

Relé A : tempo di programmazione di 6'01'', con modalità a limitazione di impulso per l'alimentazione del relé D e modalità ad inserimento ritardato per l'alimentazione dell'elettrovalvola di degassamento (EV<sub>3</sub>) ;

Relé B : tempo di programmazione di 2'44'', con modalità a limitazione di impulso per l'alimentazione dell'elettrovalvola di rientro dell'aria nel cilindro in PVC (EV<sub>4</sub>) ;

Relé C : tempo di programmazione di 3'46'', con modalità a limitazione di impulso per l'alimentazione della pompa da vuoto ;

Relé D : tempo di programmazione di 2'12'', con modalità a limitazione di impulso per l'alimentazione delle elettrovalvole di svuotamento dei beaker (EV<sub>5</sub> ed EV<sub>6</sub>) e modalità ad inserimento ritardato per l'alimentazione delle elettrovalvole per il riempimento e per il ricambio dell'acqua nei beaker (EV<sub>1</sub> ed EV<sub>2</sub>).

Per la durata delle varie fasi si ha quindi :



*Rinnovo dell'aria nel cilindro in PVC* :  $t = 2'44''$ , tempo corrispondente ad un volume di aria ricambiato pari a circa 11 l in quanto la portata della pompa è pari a 4 l/min. Si tenga presente che il volume utile nel cilindro in PVC è di circa 2.9 l ;

*Vuoto nel cilindro in PVC* :  $t = 1'02''$ , ciò consente di raggiungere una depressione di 49 cmHg (0.65 atm). Il vantaggio in questo caso consiste nel fatto che dalla miscelazione del 35% in volume di aria non satura rimasta nel cilindro con il 65% in volume di aria satura ricca di radon proveniente dal degassamento del campione di acqua si ottiene, entro certe condizioni, aria non satura e pertanto si impediscono dannosi fenomeni di condensa sulle pareti del fotomoltiplicatore e a contatto con lo strato di solfuro di zinco della cella a scintillazione ;

*Svuotamento dei beaker* :  $t = 2'12''$  ;

*Riempimento e ricircolo di acqua nei beaker* :  $t = 3'49''$ , per una media di circa 2.7 l/ciclo. Ciò corrisponde a poco più del doppio del volume complessivo dei due beaker (0.51 + 0.69 l) ;

*Degassamento* :  $t \approx 12'$ . Considerando che il tempo necessario al degassamento è stato valutato intorno ai 4', tale eccesso è dovuto unicamente all'intervallo minimo di commutazione dell'inseritore a tempo meccanico che è pari a circa 18', tenendo conto dell'inevitabile anticipo nella commutazione dovuto alla conformazione della leva di azionamento.

### **3.5.2. Strumentazione elettrica impiegata**

- *Inseritore a tempo meccanico VEMER Mod. VJ 552 I* (Cfr. § 2.5)
- *Batterie ricaricabili al piombo Mod. FG20121* (Cfr. § 2.5)
- *Caricabatterie per batterie al piombo COMPIT PB 24/0.3* (Cfr. § 2.5)
- *Micropompa a membrana per gas KNF Mod. NMP 30* (Cfr. § 2.5)
- *Elettrovalvole a 2 vie RS Tipo 439-060* (Cfr. § 2.5)
- *Elettrovalvole a 2 vie BÜRKERT Tipo 125301V* da 1/4" alimentate a 24VDC, potenza nominale delle bobine : 8W, grado di protezione del connettore DIN : IP65, range di utilizzo : 0 ÷ 6 bar

- *Elettrovalvola a 2 vie RS Tipo 439-278 da 1/4" alimentata a 24VDC, potenza nominale delle bobine : 8W, grado di protezione del connettore DIN : IP65, range di utilizzo : 0 ÷ 4.5 bar*

- *Relé*

I relé esaminati sono dispositivi programmabili che ricevono un segnale di alimentazione in ingresso e, tramite commutazione di interruttori interni, stabiliscono contatti su morsetti a cui è consentito l'accesso dall'esterno nella maniera che sarà di seguito descritta.

Lo zoccolo su cui il relé è montato consente di raggiungere tutti i contatti di uscita.

Sono stati presi in considerazione relé programmabili a due funzioni e multifunzione, con due contatti di scambio.

*Relè temporizzati programmabili a due funzioni **RZEA***

Ne sono impiegati due, contrassegnati con le lettere A e B nello schema elettrico in figura 3.6.

Principali caratteristiche :

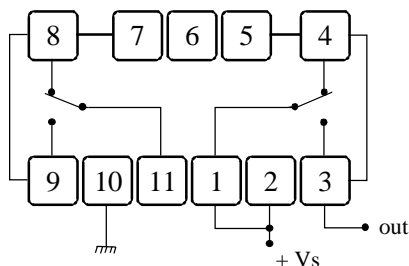
- Inserimento o disinserimento ritardato
- Temporizzazioni : 50..150 ms, 0.1..1 s, 1..10 s, 0.1..1 min, 1..10 min, 0.1..1 h, 1..10 h
- Tensione di alimentazione : 12..48 V
- Tensione massima di commutazione : 250 V

Modalità '*inserimento ritardato*' :

Dopo il tempo programmato, a partire dall'istante di inizio alimentazione, avviene la commutazione degli interruttori interni che portano i contatti 1-4 e 11-8 rispettivamente nei contatti 1-3 e 11-9.

Il tempo di ritardo  $\Delta t$  è regolabile tramite apposito dispositivo posto sul pannello frontale del relé.

Stabilendo i contatti elettrici come nella figura che segue



e prelevando l'uscita sui morsetti 3 e 10, si ha a disposizione il segnale dopo il tempo di ritardo voluto.

Si consideri inoltre che il segnale a *'limitazione d'impulso'* può essere ottenuto prelevando l'uscita sui morsetti 4 e 10. Ciò è particolarmente utile quando si debba disporre delle due funzionalità contemporaneamente sullo stesso relè con un unico tempo programmabile, che corrisponde alla durata dell'impulso per la modalità *'limitazione di impulso'* e all'intervallo di attesa per la modalità *'inserimento ritardato'*.

### Relè temporizzati multifunzioni GZU 30

Ne sono impiegati due, contrassegnati con le lettere C e D nello schema elettrico in figura 3.6.

Principali caratteristiche :

- 5 funzioni programmabili : Inserimento ritardato, disinserimento ritardato, limitazione di impulso, prolungamento d'impulso, intermittente.
- Temporizzazione : 50..150 ms, 0.1..1 s, 1..10 s, 0.1..1 min, 1..10 min, 0.1..1 h, 1..10 h
- Tensione di alimentazione : 12..48 V
- Tensione massima di commutazione : 250 V

Modalità *'inserimento ritardato'* :

Il movimento dei morsetti interni nonché il collegamento elettrico è analogo a quello già descritto per il tipo RZEA. L'uscita, pertanto, può essere prese ai morsetti 10 e 3 ottenendo l'impulso ad inserimento ritardato

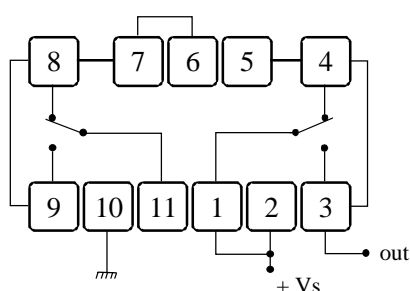
Modalità *'limitazione di impulso'* :

Nell'istante in cui il relè è alimentato avviene la commutazione sui contatti 1-3 e 11-9.

Dopo il tempo programmato avviene la commutazione che porta i contatti 1-3 e 11-9 rispettivamente nei contatti 1-4 e 11-8.

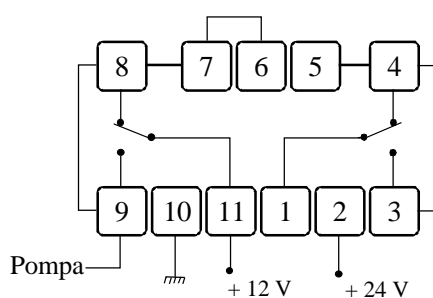
La durata dell'impulso è regolabile tramite apposito dispositivo posto sul pannello frontale del relè.

Stabilendo i contatti elettrici come nella figura che segue



e prelevando l'uscita sui morsetti 3 e 10, si ha a disposizione il segnale a *limitazione di impulso* desiderato, poiché il morsetto 3 verrà a trovarsi isolato dopo il tempo programmato.

In particolare, poiché per semplicità tutti i relé sono alimentati a 24 V, la pompa da vuoto è alimentata a 12 V utilizzando i contatti 9-10 secondo lo schema seguente (relé C) :

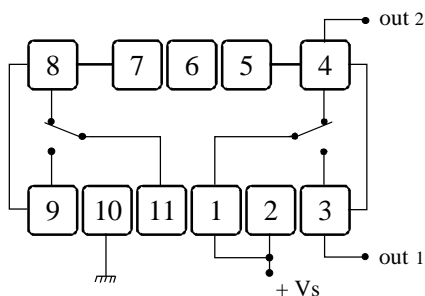


Modalità '*intermittenza*' :

Nell'istante in cui il relé è alimentato avviene la commutazione sui contatti 1-3 e 11-9.

Da questo momento avvengono successive commutazioni che interessano le coppie di morsetti 3-4 e 8-9, secondo l'intervallo di tempo programmato. Il tempo di durata dell'impulso ed il tempo di attesa (a segnale nullo) sono perciò coincidenti.

Stabilendo i contatti elettrici come nella figura che segue



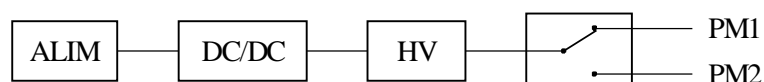
si ha che :

- prelevando l'uscita sui morsetti 3 e 10, si ha intermittenza che parte con segnale attivo ;
- prelevando l'uscita sui morsetti 4 e 10, si ha intermittenza che parte con segnale nullo.

### 3.5.3. Strumentazione elettronica impiegata

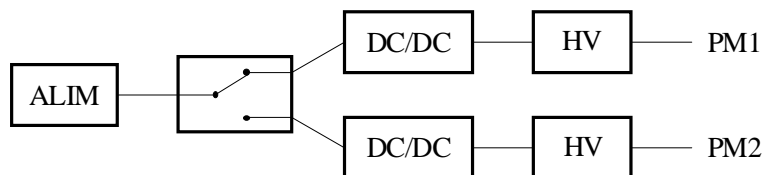
Con riferimento allo schema elettrico in § 3.4 si è deciso di alimentare alternativamente i fotomoltiplicatori PM1 e PM2 utilizzati nelle catene di rivelazione dei sistemi  $\alpha$  e  $\gamma$ , pertanto con una opportuna gestione della scheda multicanale si possono memorizzare sia gli spettri ottenuti dal rivelatore  $\gamma$  a scintillazione che dalla cella di Lucas.

La seguente soluzione prevede l'utilizzo di un solo dispositivo per l'alta tensione :



Con l'impiego di un relé o di un inseritore a tempo si può commutare l'alta tensione sui due fotomoltiplicatori ; poiché la tensione da aprire è molto elevata ( $\sim 800$  V) si reputa oneroso l'uso di tali dispositivi.

Si preferisce allora spostare la commutazione sui 12 V, utilizzando due convertitori DC/DC, due moduli di alta tensione ed un inseritore a tempo meccanico LEGRAND come nello schema sotto riportato :



In questa maniera si rendono indipendenti le due linee di alimentazione che possono così essere utilizzate anche separatamente, mentre l'impiego dell'inseritore a tempo consente una vantaggiosa versatilità di programmazione.

Componenti comuni alle catene di rivelazione  $\alpha$  e  $\gamma$ :

- Alimentatore di bassa tensione stabilizzato K.E.R.T. Mod. AT 2 (Cfr. § 2.5)
- Inseritore a tempo meccanico LEGRAND 497 54 Maxi Rex QT

Tensione di funzionamento : 230V/50÷60 Hz. Il contatto tra i morsetti 11-12 è stabilito con cavalierini abbassati. La commutazione con cavalierini sollevati stabilisce il contatto tra i morsetti 11-14. L'intervallo di tempo minimo di commutazione è di 15 minuti.

Componenti propri della catena di rivelazione  $\gamma$ :

Si rimanda al § 2.5

Componenti propri della catena di rivelazione  $\alpha$ :

- Convertitore DC/DC Traco TEM 10-1221

Accetta in ingresso una tensione compresa tra 9 e 18 V, restituisce in uscita una tensione di  $\pm 12$  V con una corrente massima di 400 mA.

Nel nostro caso la tensione in ingresso e quella in uscita sono coincidenti e pari a 12 V.

- Alimentatore di alta tensione HAMAMATSU Mod. C4710-51

È un dispositivo che riceve in ingresso una alimentazione di 12 V e restituisce in uscita una tensione regolabile tramite un potenziale di controllo o un potenziometro.

Il range di variabilità della tensione in uscita è di circa 240..1500 V. Il segnale di alta tensione in uscita è nullo per valori del potenziale di controllo compresi tra 0 e +0.45 V, e per valori superiori a 5.5 V.

Nel nostro caso la tensione in uscita, 800 V, è regolata tramite un potenziometro da 10 k $\Omega$

- Partitore di tensione

Come descritto in § 3.4.1

- Fotomoltiplicatore HAMAMATSU Mod. R1306

- Signal Processing Module TESYS Mod. SPM 02

Incorpora un preamplificatore, un amplificatore e un discriminatore. Il segnale in uscita è disponibile in forma logica o analogica.

- Scheda analizzatore multicanale EG&G ORTEC MCB Type 916-002 (Cfr. § 2.5)

### 3.6. Valutazione del fondo

I conteggi ottenuti dalle catene di rivelazione per i due sistemi proposti sono rappresentativi di :

*sistema  $\alpha$*

- fondo ambiente
- radon presente nel campione di acqua
- radon presente nell'aria utilizzata per il degassamento

*sistema  $\gamma$*

- fondo ambiente
- radon presente nel campione di acqua

Per consentire il confronto tra i due sistemi di monitoraggio si deve determinare per ognuno un valore del fondo che permetta di ricavare valori rappresentativi del solo contributo dovuto al radon presente nel campione di acqua.

A tale scopo è stata avviata una misura con le seguenti modalità : il BM è stato riempito con acqua “vecchia”, ovvero chiusa in contenitore a tenuta per un periodo di

tempo sufficientemente lungo (> 20 gg) da poter ragionevolmente pensare che tutto il radon in essa presente sia decaduto. In tal modo i conteggi ottenuti saranno rappresentativi del solo fondo ambientale.

Per il sistema  $\alpha$  è stato campionato un volume di acqua e fatto degassare più volte secondo il programma giornaliero, così da eliminare tutto il radon in esso contenuto. In tal modo, la successiva misura terrà conto dei conteggi dovuti al fondo ambientale e quelli dovuti alla eventuale presenza di radon nell'aria.

I risultati ottenuti per tempi di acquisizione di 60' sono rappresentati in tabella 3.1.

#### Beaker Marinelli

Data e ora	Conteggi lordi
20/03 18.00	18351
21/03 2.00	18629
21/03 10.00	18211
21/03 18.00	18169
22/03 2.00	18498
22/03 10.00	18494
22/03 18.00	18393
23/03 2.00	18589
23/03 10.00	18074
23/03 18.00	18320
24/03 2.00	18531
24/03 10.00	17855

<i>Analisi statistica</i>	
Media	18343
Errore standard	67
Deviazione standard	231
Varianza campionaria	53253
Intervallo	774
Minimo	17855
Massimo	18629
Somma	220114
Conteggio	12
Livello di confidenza(68.0%)	69

#### Cella Lucas

Data e ora	Conteggi lordi
20/03 16.00	363
21/03 0.00	282
21/03 8.00	862
21/03 16.00	286
22/03 0.00	461
22/03 8.00	723
22/03 16.00	809
23/03 0.00	854
23/03 8.00	960
23/03 16.00	757
24/03 0.00	955
24/03 8.00	961

<i>Analisi statistica</i>	
Media	689
Errore standard	77
Deviazione standard	267
Varianza campionaria	71076
Intervallo	679
Minimo	282
Massimo	961
Somma	8273
Conteggio	12
Livello di confidenza(68.0%)	80

**Tabella 3.1** - Stima del fondo. Dati acquisiti con scheda multicanale ORTEC MCB Type 916-002



In base alle considerazioni del § 2.6 si ha quindi :

$$F_{\alpha} = 689 \pm 80$$

$$F_{\gamma} = 18343 \pm 69$$

### 3.7. Procedura di calibrazione

Seguendo la procedura descritta nel § 2.7 si è spillata acqua arricchita di radon in un beaker Marinelli da 0.95 l (3''×3'') in corrispondenza di un ciclo di misura del sistema di monitoraggio ottenendo un valore di concentrazione, riferito all'istante di spillaggio, di  $91 \pm 3$  Bq/l.

Pertanto per una ROI che si estende dal picco a 242 keV del  $^{214}\text{Pb}$  al picco a 609 keV del  $^{214}\text{Bi}$  (canali  $54 \div 160$  della scheda multicanale ORTEC MCB Type 916-002), relativamente ad un tempo di conteggio di 60' ed avendo assunto un fondo di  $18343 \pm 69$  conteggi, si è potuta calcolare l'efficienza del sistema  $\gamma$  :

$$\text{Eff}_{\gamma} = \frac{C_{\text{netti}}}{\text{DF} \cdot C_{\text{Rn}} \cdot T_{\text{acquisizione}}} \cong \frac{15824}{0.9449 \cdot 91 \cdot 60} \cong 3.075 \text{ cpm/Bq l}^{-1}$$

$$\sigma_{\text{Eff}_{\gamma}} = \text{Eff}_{\gamma} \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\text{netti}}}{C_{\text{netti}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{C_{\text{Rn}}}}{C_{\text{Rn}}}\right)^2} \cong 0.096 \text{ cpm/Bq l}^{-1}$$

avendo riportato i conteggi netti all'istante dello spillaggio con un DF pari a :

$$\text{DF} = e^{-\frac{\Delta t + 30}{7938}} \cong 0.9449$$

ed essendo  $\Delta t = 420'$ .

Tale valore di efficienza è assai simile a quello già calcolato nel § 2.7.1, come era lecito attendersi.

Determiniamo ora la concentrazione di radon nel cilindro in PVC in cui è alloggiata la cella di Lucas ; anch'essa riferita all'istante dello spillaggio.

Il volume utile del cilindro in PVC e il volume del beaker in cui è contenuto il campione di acqua sono noti e pari a :

$$V_{PVC} = 0.0029 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{beaker}} = 0.507 \text{ l}$$

Dal valore della concentrazione di radon nell'acqua spillata, con l'ipotesi che tutto il radon sia degassato e trasferito nel cilindro in PVC, si può risalire all'attività in quest'ultimo :

$$A_{PVC} = C_{Rn} \cdot V_{\text{beaker}} \cong 91 \cdot 0.507 \cong 46 \text{ Bq}$$

$$\sigma_{A_{PVC}} = \sigma_{C_{Rn}} \cdot V_{\text{beaker}} \cong 3 \cdot 0.507 \cong 1 \text{ Bq}$$

essendo il DF trascurabile dal momento che trascorrono pochi minuti tra la fine del riempimento del beaker (e quindi dello spillaggio del beaker Marinelli da 0.95 l) e il degassamento con trasferimento del radon nel cilindro in PVC.

Si ottiene quindi :

$$C_{Rn,PVC} = \frac{A_{PVC}}{V_{PVC}} \cong \frac{46}{0.0029} \cong 15867 \text{ Bq/m}^3$$

$$\sigma_{C_{Rn,PVC}} = \frac{\sigma_{A_{PVC}}}{V_{PVC}} \cong \frac{1}{0.0029} \cong 452 \text{ Bq/m}^3$$

Nota l'attività nel cilindro in PVC si può ricavare l'efficienza del sistema  $\alpha$  per una ROI estesa su tutto lo spettro continuo (canali 5 ÷ 1500 della scheda multicanale ORTEC MCB Type 916-002), relativamente ad un tempo di acquisizione di 60'. Avendo assunto un fondo di  $689 \pm 80$  conteggi si ottiene :

$$Eff_{\alpha} = \frac{C_{\text{netti}}}{DF \cdot C_{Rn,PVC} \cdot T_{\text{acquisizione}}} \cong \frac{38656}{0.9593 \cdot 15867 \cdot 60} \cong 0.0420 \text{ cpm/Bq m}^{-3}$$

$$\sigma_{\text{Eff}_\alpha} = \text{Eff}_\alpha \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\text{netti}}}{C_{\text{netti}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{C_{\text{Rn,PVC}}}}{C_{\text{Rn,PVC}}}\right)^2} \cong 0.0010 \text{ cpm/Bq m}^{-3}$$

avendo riportato i conteggi netti all'istante dello spillaggio con un DF pari a :

$$\text{DF} = e^{-\frac{\Delta t + 30}{7938}} \cong 0.9593$$

ed essendo  $\Delta t = 300'$ .



Volendo riferire l'efficienza alla concentrazione nel campione di acqua si ottiene :

$$\text{Eff}_\alpha = \frac{C_{\text{netti}}}{\text{DF} \cdot C_{\text{Rn}} \cdot T_{\text{acquisizione}}} \cong \frac{38656}{0.9593 \cdot 91 \cdot 60} \cong 7.400 \text{ cpm/Bq l}^{-1}$$

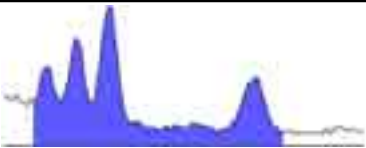

$$\sigma_{\text{Eff}_\alpha} = \text{Eff}_\alpha \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\text{netti}}}{C_{\text{netti}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{C_{\text{Rn}}}}{C_{\text{Rn}}}\right)^2} \cong 0.215 \text{ cpm/Bq l}^{-1}$$

Un confronto tra le prestazioni dei due sistemi può essere fatto analizzando le tabelle 3.2 e 3.3, dedotte dalla prova di calibrazione, in cui compaiono grandezze già definite nel § 2.1 e nel § 2.7.1.

Si nota che la maggior efficienza della cella di Lucas rispetto al beaker Marinelli migliora il rapporto S/N e la MDA di un ordine di grandezza ; è inoltre conveniente scegliere un tempo di acquisizione di 60'.

	Beaker Marinelli		Cella di Lucas	
				
	valore	$\sigma$	valore	$\sigma$
Conteggi lordi	34167	185	39345	198
Fondo	18343	69	689	80
Conteggi netti	15824	197	38656	214
Efficienza (cpm/Bq l <sup>-1</sup> )	3.075	0.096	7.400	0.215
Rapporto S/N	117	1	1473	86
LLD (cpm)	6.77	0.01	1.31	0.08
MDA (Bq/l)	2.20	0.07	0.18	0.01

**Tabella 3.2** - Parametri relativi a 60' di conteggio

	Beaker Marinelli		Cella di Lucas	
				
	valore	$\sigma$	valore	$\sigma$
Conteggi lordi	8542	46	9836	50
Fondo	4586	17	172	20
Conteggi netti	3956	49	9664	53
Efficienza (cpm/Bq l <sup>-1</sup> )	3.075	0.096	7.400	0.215
Rapporto S/N	58	1	736	43
LLD (cpm)	13.54	0.03	2.62	0.15
MDA (Bq/l)	4.40	0.14	0.35	0.02

**Tabella 3.3** - Parametri relativi a 15' di conteggio

### 3.8. Valutazione dell'efficacia del ricambio di aria nel cilindro in PVC

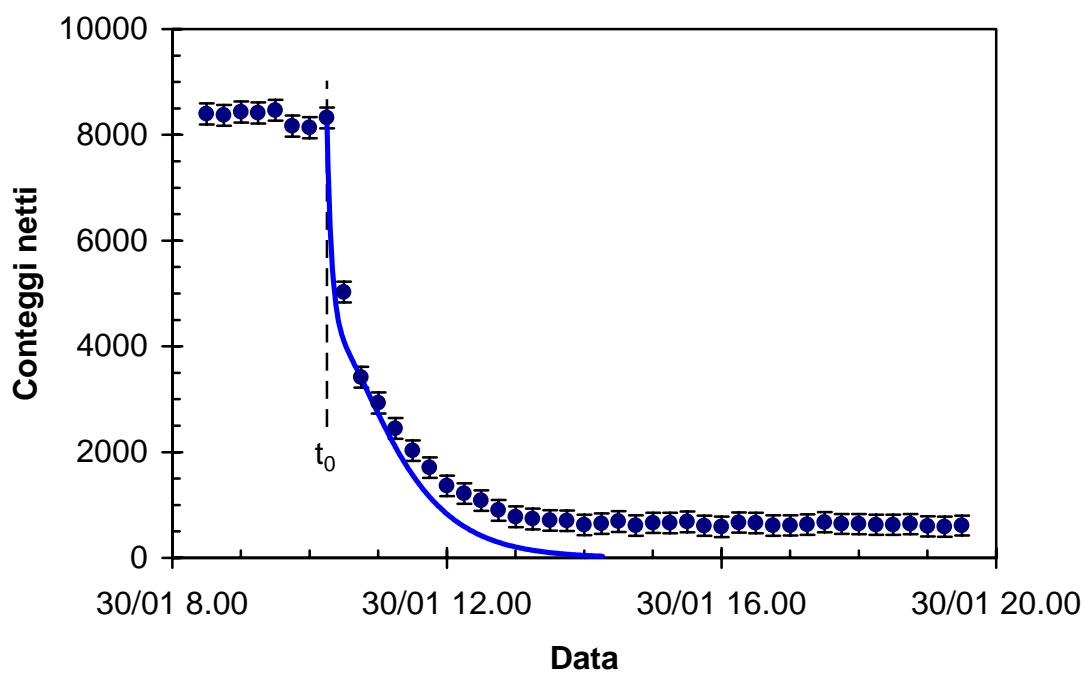
Dopo aver riempito il beaker di campionamento si è avviato manualmente<sup>2</sup> il sistema a relé ed elettrovalvole che provvede al degassaggio e al trasferimento nel cilindro in PVC del radon disciolto nell'acqua. Dopo aver collegato la scheda multicanale alla catena elettronica del sistema  $\alpha$  si è quindi programmato un ciclo di acquisizioni consecutive da 15'. A metà ciclo è stato di nuovo avviato manualmente il sistema elettro idraulico ; l'aria nel cilindro in PVC è stata rinnovata e il degassamento è avvenuto su un campione di acqua priva di radon ; le misure seguenti sono quindi indicative della concentrazione di radon nell'aria ambiente usata per il ricircolo e il degassaggio e, a meno di questo contributo, permettono di valutare l'efficacia del ricambio di aria nel cilindro in PVC tra cicli contigui.

Si è ottenuto l'andamento mostrato in figura 3.8 da cui si evince un decremento del 60% del segnale a 30' dal ricambio di aria ; tale decremento sale a circa il 92% a distanza di  $3^h45' \div 5^h$  ove i conteggi netti scendono a circa 620. Si noti che la curva a tratto continuo rappresenta la decrescita del segnale prodotto dalla cella di Lucas a seguito della completa estrazione di radon in corrispondenza all'istante di tempo  $t_0$  (Cfr. § H.5 in allegato) : sottraendo tale contributo all'andamento del conteggio netto reale si ottiene il grafico in figura 3.9 (cerchi pieni) tracciato a partire dall'istante di tempo  $t_0 + 45'$ . La curva risultante dimostra il fatto che, come è logico, per la modalità con cui avviene il ricircolo il radon non può mai essere estratto completamente dal cilindro in PVC ; il radon inoltre rientra veicolato continuamente dall'aria stessa di ricircolo e dall'aria di degassaggio del campione di acqua priva di radon.

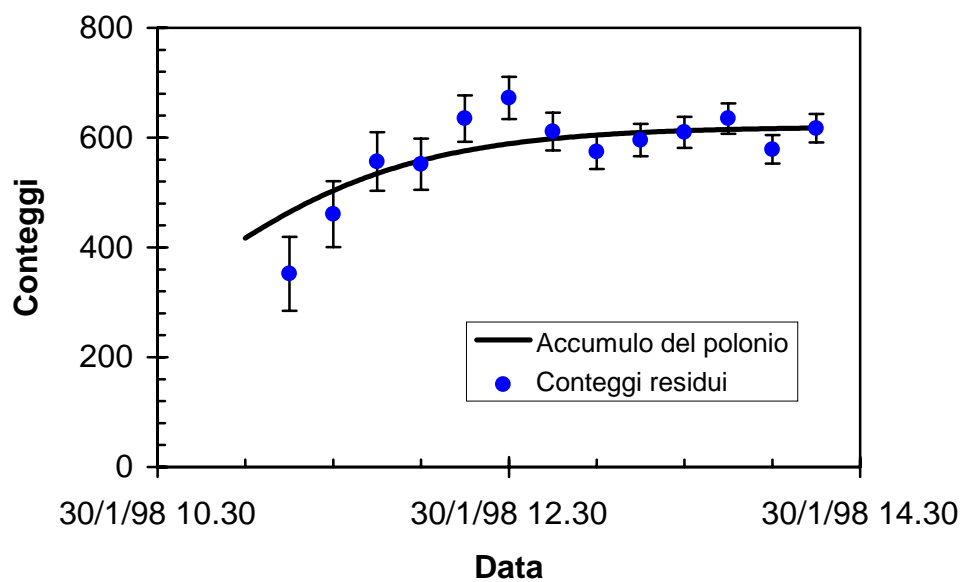
In base ai valori di efficienza ricavati nel § 3.7 il livello di conteggio residuo corrisponde ad un equivalente di  $\sim 4$  Bq/l di radon in acqua degassata con aria in cui la concentrazione di radon è dell'ordine di  $350 \text{ Bq/m}^3$  (valore consueto per il locale in cui si è svolta la prova). Pertanto si reputa efficace il ricambio di aria nel cilindro in PVC tra cicli contigui a meno del 5%, poiché il livello di conteggio prima del ricambio di aria (istante  $t_0$  in figura 3.8) è indicativo di una concentrazione di  $\sim 75 \text{ Bq/l}$  di radon in acqua.

---

<sup>2</sup> Tutti i cavalierini dell'inseritore a tempo meccanico sono stati preventivamente abbassati ; per commutare manualmente i 24 V sul contatto relativo all'alimentazione dei relé è sufficiente sollevare (e tenere sollevata) la leva di commutazione.



**Figura 3.8** - Andamento dei conteggi a seguito del ricambio dell'aria nel cilindro in PVC all'istante  $t_0$



**Figura 3.9** - Crescita dei conteggi dovuta al radon residuo nel cilindro in PVC al termine della prova

Alla valutazione del fondo strumentale utilizzato per derivare i conteggi netti si è giunti continuando il ciclo di acquisizioni sullo stesso volume di aria.

Ci si attende che la curva segua l'andamento esponenziale tipico del decadimento radioattivo, ed è quindi lecito pensare che tenderà asintoticamente al valore del fondo.

In questo caso, da considerazioni analitiche si può tentare di estrapolare il valore del fondo che chiameremo 'strumentale' (per indicare che, contrariamente a quanto avvenuto per il calcolo del fondo utilizzato per la calibrazione dei sistemi di monitoraggio  $\alpha$  e  $\gamma$ , non tiene conto del contributo dovuto all'aria esterna).

Utilizzando la ben nota legge del decadimento radioattivo, per i conteggi negli istanti  $t_1$  e  $t_2$  sussisteranno le relazioni :

$$\text{Cont}_1 = \text{Cont}_0 \cdot e^{-t_1/7938} + \text{Fondo}$$

$$\text{Cont}_2 = \text{Cont}_0 \cdot e^{-t_2/7938} + \text{Fondo}$$

e, sostituendo nella prima eq. l'espressione di  $\text{Cont}_0$  ricavata dalla seconda eq. si ottiene :

$$\text{Fondo} = \frac{\text{Cont}_2 \cdot e^{\Delta t/7938} - \text{Cont}_1}{e^{\Delta t/7938} - 1}$$

dove  $\Delta t = t_2 - t_1$

Per migliorare la statistica si è pensato di assumere come valore per i conteggi  $\text{Cont}_1$  e  $\text{Cont}_2$  quello ottenuto come media su un 'range' di valori centrati nei rispettivi istanti di tempo  $t_1$  e  $t_2$  e opportunamente corretti per il D.F.

È evidente che la correzione per il D.F. del conteggio interessa anche il contributo dovuto al fondo, cosicchè i valori precedenti l'istante  $t_i$  di riferimento sono stimati per difetto mentre quelli seguenti lo sono per eccesso. Dato il basso valore atteso del fondo rispetto al conteggio, si decide di accettare l'errore introdotto da questa approssimazione in virtù di una più semplice trattazione.

Prendendo  $\text{Cont}_1$  come media dei primi 16 valori riportati tramite il D.F. all'istante medio e procedendo analogamente per  $\text{Cont}_2$  in riferimento agli ultimi 16 valori, si ottiene :

$\text{Cont}_1 = 604$  (conteggio medio in 15')

$\text{Cont}_2 = 449$  (conteggio medio in 15')

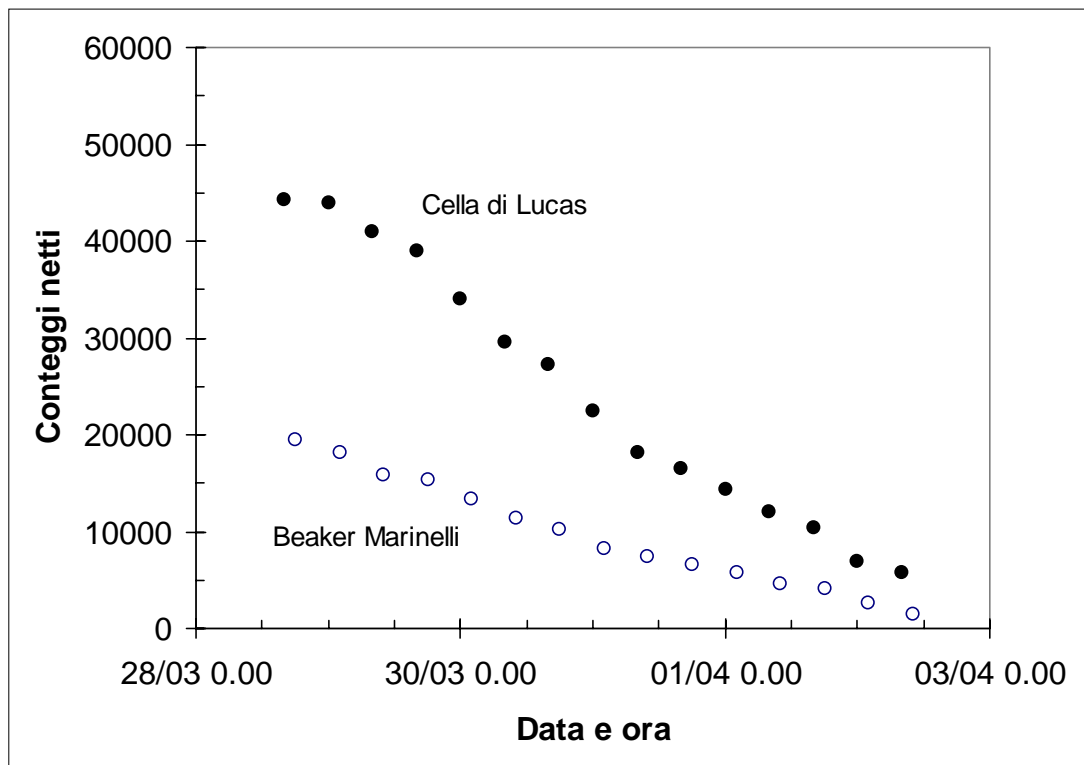
Pertanto il valore del fondo risulta :

Fondo = 1.5 cpm

### 3.9. Andamento del tipico ciclo di misura

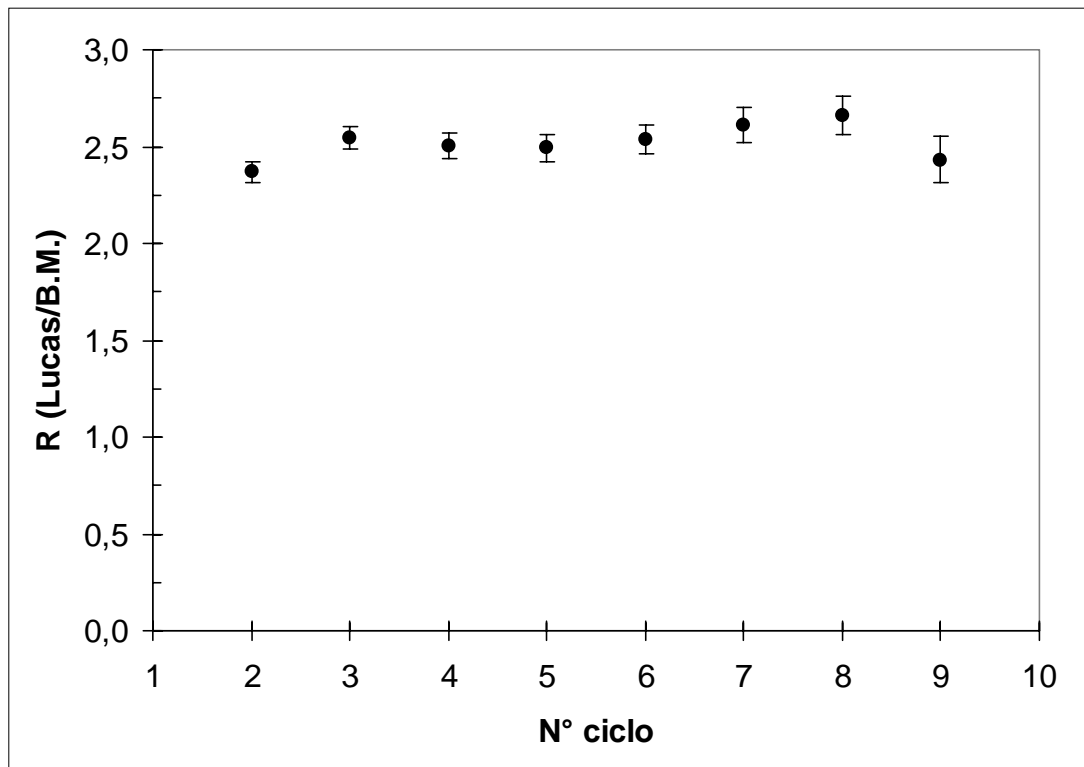
Alimentando i due sistemi di monitoraggio  $\alpha$  e  $\gamma$  con acqua arricchita di radon ed avviando un ciclo di misure si sono osservati gli andamenti in figura 3.10

In figura 3.11 è riportato l'andamento del rapporto R tra i conteggi ottenuti con il sistema  $\alpha$  e quelli ottenuti con il sistema  $\gamma$ . La costanza di questo andamento è indicativa della stabilità del sistema  $\alpha$  nel tempo, considerata l'affidabilità del sistema  $\gamma$  [7].



**Figura 3.10** - Andamento dei conteggi netti in un tipico ciclo di misura





**Figura 3.11** - Andamento del rapporto  $R$

### 3.10. Osservazioni sul sistema $\alpha$

Il sistema è stato progettato per la misura in continuo della concentrazione di radon in acqua, in vista di un'applicazione presso una stazione fissa di monitoraggio.

Le scelte operative che hanno consentito di realizzare il sistema sono state spesso orientate da esigenze di laboratorio ben diverse da quelle prevedibili in un futuro impiego. Ad esempio, la disponibilità illimitata di acqua, che si può avere in un eventuale utilizzo presso una sorgente, consente di semplificare le fasi del ciclo eliminando la fase di svuotamento. Infatti non si ha più la necessità di economizzare sui tempi di ricircolo per il campionamento di acqua al fine di aumentare l'autonomia del sistema, considerando la capacità limitata della riserva disponibile in laboratorio. Tuttavia la gestione automatica del sistema si è dimostrata del tutto soddisfacente e adatta ad un impiego in una stazione remota.

L'assenza di schermaggi ha consentito di realizzare un sistema di misura facilmente trasportabile, a differenza del sistema  $\gamma$ .

La stima sulla minima attività rivelabile con il sistema  $\alpha$  mostra un miglioramento di circa un fattore 10 rispetto a quella ottenibile con il sistema  $\gamma$  ; rendendone vantaggioso l'utilizzo per il monitoraggio di sorgenti di acqua a basse concentrazioni di radon.

Dalle prime prove effettuate si nota inoltre una buona stabilità della risposta del sistema al variare delle condizioni di misura ; tuttavia questo risultato andrà verificato a lungo termine e in diverse condizioni operative in quanto la cella di Lucas viene a trovarsi a contatto diretto con il mezzo oggetto della misura : questo può portare al deterioramento dello strato di solfuro di zinco a causa di gas aggressivi che possono trovarsi disciolti nell'acqua (ad esempio l'acido solfidrico  $H_2S$ ).

Inoltre c'è da considerare che il recipiente in cui è contenuta la cella di Lucas è sottoposto ciclicamente a depressione ; un grado di vuoto eccessivo in relazione alle condizioni di temperatura dell'ambiente e dell'aria satura dal degassamento del campione di acqua può comportare fenomeni di condensa sul fotocatodo e sullo strato di solfuro di zinco.

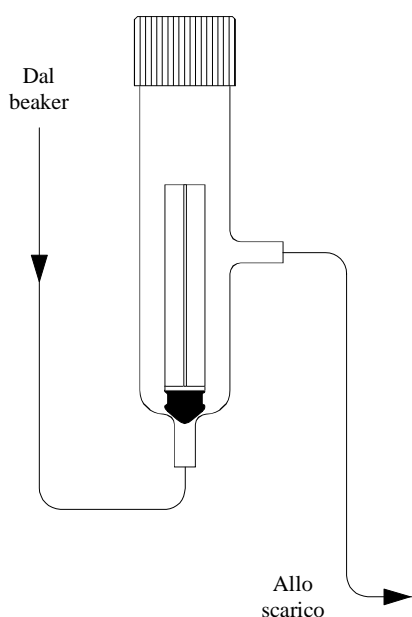
Una versione semplificata del sistema  $\alpha$ , adattata all'impiego di una riserva d'acqua praticamente illimitata, è descritta nell'allegato F [10].

## 4. Misura “in continuo” della concentrazione di radon in acqua mediante cella a scintillazione. Sistema definitivo

### 4.1. Principali modifiche apportate

Le principali modifiche riguardano essenzialmente la disposizione dei componenti e il circuito idraulico ; sono state apportate nell’ottica dell’installazione del sistema in una stazione remota in cui sia disponibile una riserva di acqua illimitata ed energia elettrica erogata con continuità.

Si è già accennato all’eliminazione della fase di svuotamento e al ricambio dell’acqua nel beaker per ricircolo : da prove effettuate con l’impiego delle sole elettrovalvole  $EV_1$  ed  $EV_2$  sul sistema descritto nell’allegato F (schema in fig. 9) [10] è emerso un lentissimo aumento del livello dell’acqua nella sommità del beaker di campionamento. Ciò impedisce un funzionamento particolarmente prolungato del sistema in quanto durante la fase di degassamento si potrebbe arrivare all’ingresso dell’acqua nel cilindro in PVC. Si è ovviato a questo inconveniente sostituendo l’elettrovalvola a valle del beaker con il dispositivo di svuotamento mostrato in figura 4.1.



**Figura 4.1** - Dispositivo di svuotamento

Il vincolo perché tale dispositivo operi correttamente è che la pressione dell'acqua che entrando dal basso agisce sulla porzione di superficie dello stantuffo coincidente con la sezione interna del condotto in vetro compensi il peso dello stantuffo stesso.

Tale pressione viene raggiunta con un dislivello di acqua almeno pari a circa 60 cm, oltre cui si ha il sollevamento ed il galleggiamento dello stantuffo impiegato. Questo ha comportato la modifica della disposizione dei componenti del sistema di campionamento di figura 3.2 come mostrato in figura 4.2 : il beaker si trova ora ad una quota superiore rispetto al cilindro in PVC in cui è alloggiata la cella di Lucas.

In questo modo si ha la garanzia che al termine della fase di ricircolo il livello dell'acqua nel beaker sia sempre costante e determinato dalla quota del bocchello di svuotamento.

Quando inizia la fase di degassamento il liquido nel dispositivo di svuotamento viene richiamato nel beaker per effetto della depressione finché l'estremità del pistone non ottura il passaggio ; al termine del degassamento, quando la depressione è praticamente annullata, l'acqua in eccesso torna nuovamente nel dispositivo<sup>1</sup>.

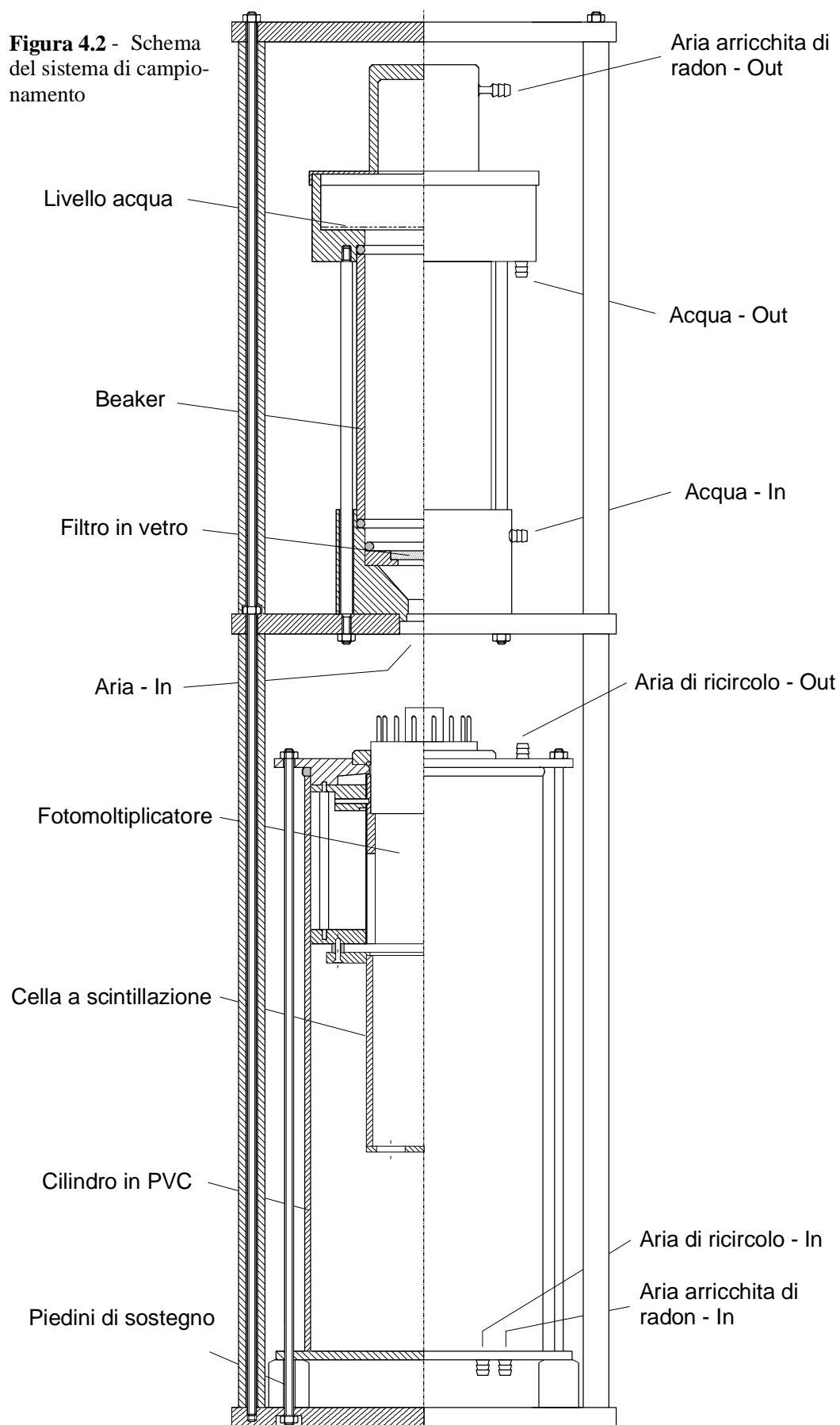
Una ulteriore modifica ha riguardato la sommità del beaker, anche in virtù del sopra citato quantitativo aggiuntivo di acqua che vi rientra. Come si può vedere in figura 4.2 è stato aggiunto un volume con funzione di polmone d'aria, particolarmente utile durante la fase di degassaggio : il trasporto di goccioline di acqua è ora impedito da una retina metallica (figura 4.4) e dalla posizione laterale del bocchello di uscita dell'aria di degassaggio.

L'aria di degassaggio, a seconda della temperatura dell'acqua da degassare, può trovarsi in condizioni di saturazione ad una temperatura superiore a quella ambiente ; pertanto è stata introdotta una serpentina in rame a valle del beaker che, trovandosi a temperatura ambiente, provvede a far condensare l'acqua in eccesso la quale, per effetto della pendenza, è drenata nuovamente verso il beaker (si veda la figura 4.4). Questo accorgimento è stato adottato per impedire che il fenomeno di condensa accada all'interno del cilindro in PVC, per le ragioni già citate in precedenti paragrafi.

---

<sup>1</sup> Perché ciò avvenga l'estremità del pistone non deve incastrarsi nel condotto di adduzione, pertanto il materiale in cui è realizzata non deve deformarsi eccessivamente e il grado di conicità che la contraddistingue non deve essere elevato.

**Figura 4.2** - Schema del sistema di campionamento



Fissato il salto termico da imporre all'aria di degassamento, per il dimensionamento della serpentina può essere usata la relazione seguente, espressione del bilancio termico :

$$U \cdot S \cdot \overline{\Delta T}_{\log} = \Gamma_{\text{aria}} \cdot c_p \cdot (T_{\text{aria,in}} - T_{\text{aria,out}}) + X_w \cdot \Gamma_{\text{aria}} \cdot c_{\text{cond}}$$

ove

- il coefficiente di scambio termico totale (kcal / h m<sup>2</sup> °C) riferito alla superficie esterna del tubo di rame è dato dalla

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{\text{in}}} \cdot \frac{D_{\text{est}}}{D_{\text{int}}} + \frac{r_{\text{est}} \cdot \ln(r_{\text{est}}/r_{\text{int}})}{k} + \frac{1}{h_{\text{out}}}}$$

in cui

$h_{\text{in}}$  è il coefficiente di scambio termico tra l'aria di degassamento e la superficie interna del tubo di rame (kcal / h m<sup>2</sup> °C) ;

$h_{\text{out}}$  è il coefficiente di scambio termico tra l'aria ambiente e la superficie esterna del tubo di rame (kcal / h m<sup>2</sup> °C) ;

$k$  è la conduttività termica del rame (kcal / h m °C) ;

$D, r$  sono rispettivamente il diametro ed il raggio del tubo di rame (m)

- $S$  è la superficie esterna del tubo di rame ;
- la differenza logaritmica media della temperatura (°C) tra l'interno e l'esterno della serpentina è data dalla :

$$\overline{\Delta T}_{\log} = \frac{\Delta T_{\text{max}} - \Delta T_{\text{min}}}{\ln \frac{\Delta T_{\text{max}}}{\Delta T_{\text{min}}}}$$

in cui

$T_{\text{aria,in}}$  è la temperatura dell'aria di degassaggio in ingresso alla serpentina ;

$T_{\text{aria,out}}$  è la temperatura dell'aria di degassaggio in uscita dalla serpentina ;

$T_{\text{amb}}$  è la temperatura dell'aria ambiente ;

$\Delta T_{\text{max}}$  è il valore massimo tra  $T_{\text{aria,in}} - T_{\text{amb}}$  e  $T_{\text{aria,out}} - T_{\text{amb}}$  ;

$\Delta T_{\text{min}}$  è il valore minimo tra  $T_{\text{aria,in}} - T_{\text{amb}}$  e  $T_{\text{aria,out}} - T_{\text{amb}}$  ;

- $\Gamma_{\text{aria}}$  è la portata dell'aria di degassamento (kg/h) :
- $c_p$  è il calore specifico a pressione costante dell'aria (kcal / kg °C).  
Occorre considerare la variabilità di tale parametro durante il degassamento in quanto la pressione varia tra ~ 0.4 e 1 bar ;
- $X_w$  kg di acqua che condensano per kg di aria umida in ingresso alla serpentina.  
Fissato il salto termico, nell'ipotesi che l'aria in ingresso ed in uscita dalla serpentina sia in condizioni di saturazione, è un parametro desumibile dal diagramma psicrometrico ;
- $c_{\text{cond}}$  è il calore latente di condensazione (kcal/kg).

Dal punto di vista della strumentazione elettrica si sono impiegati alimentatori da 12 e 24 V funzionanti con la tensione di rete in luogo di batterie al piombo e relativo caricabatterie. Inoltre si è fatto ricorso all'uso di due inseritori a tempo digitali, uno dei due è superfluo se si accetta di alimentare con continuità la catena elettronica, ma è necessario per la commutazione dell'alimentazione se si pensa di affiancare al sistema  $\alpha$  anche il sistema  $\gamma$ .

## **4.2. Il sistema di monitoraggio $\alpha$**

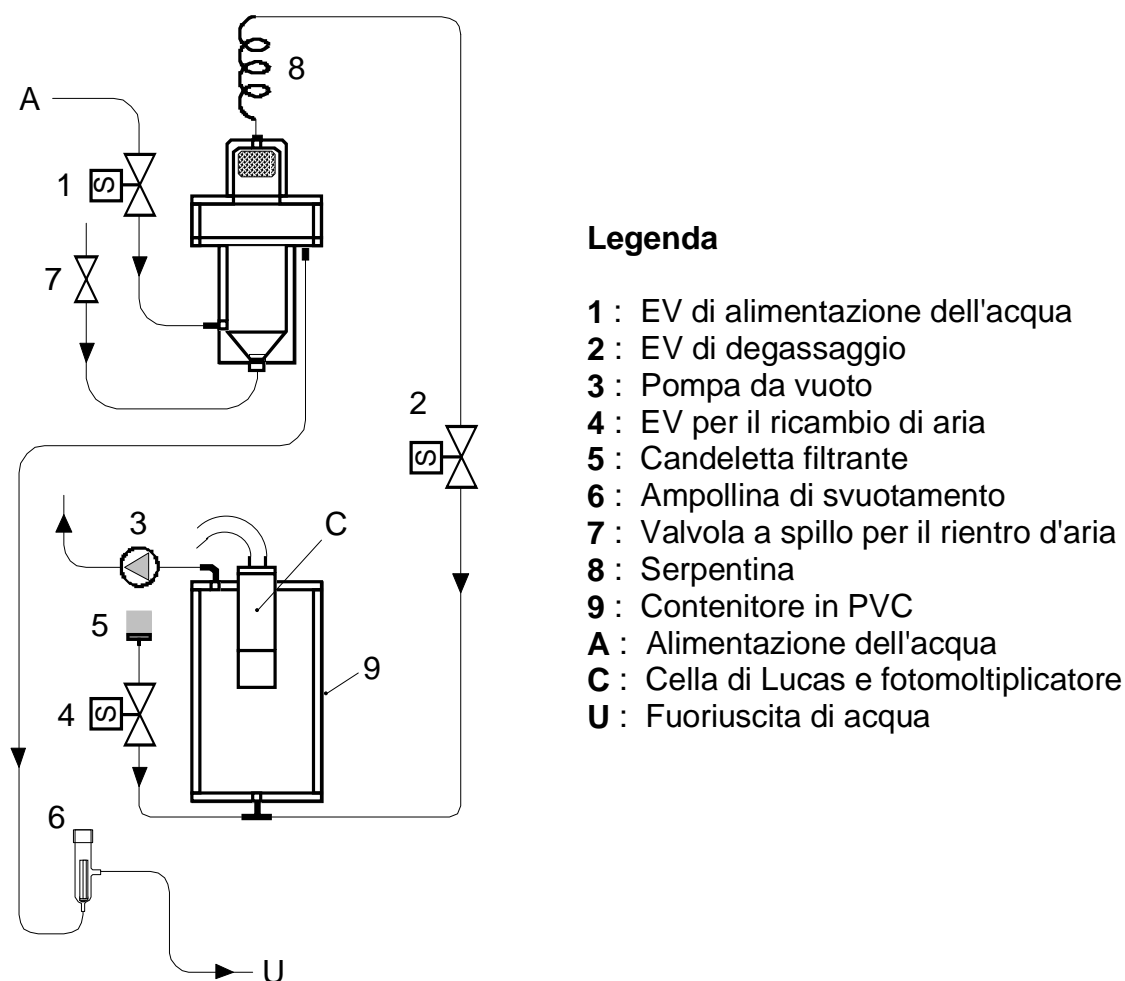
Il sistema  $\alpha$  ultimato è visibile nell'immagine in figura 4.3. In particolare i componenti elettrici sono contenuti nella cassetta stagna visibile in alto (grado di protezione IP 55) ; sotto sono visibili le elettrovalvole e il Signal Processing Module della TESYS.

Il funzionamento del sistema è desumibile da quanto esposto nel capitolo 3 e dagli schemi e la logica di attuazione riportati nelle figure 4.4, 4.5 e 4.6.

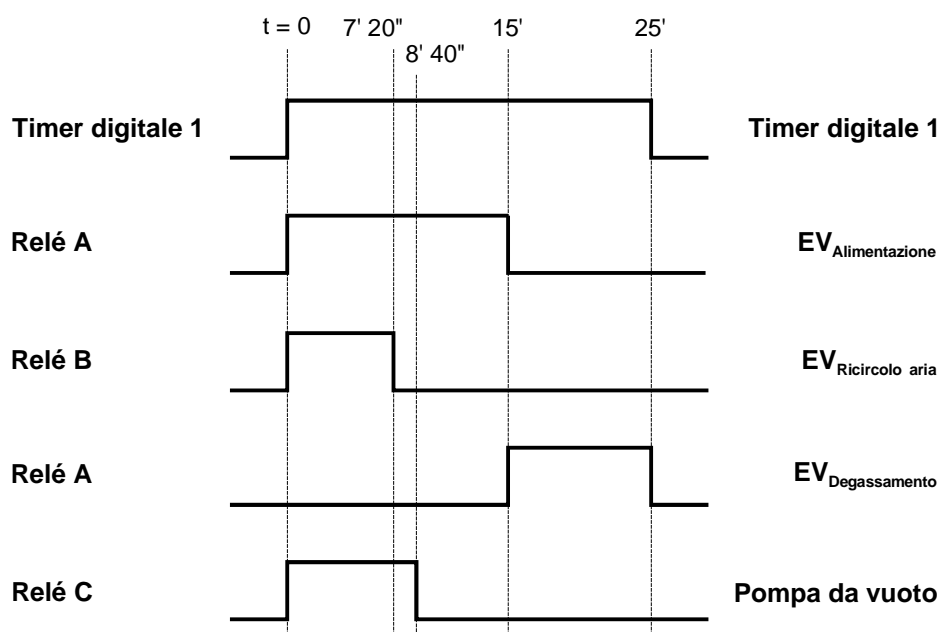


**Figura 4.3** - Foto del sistema  $\alpha$



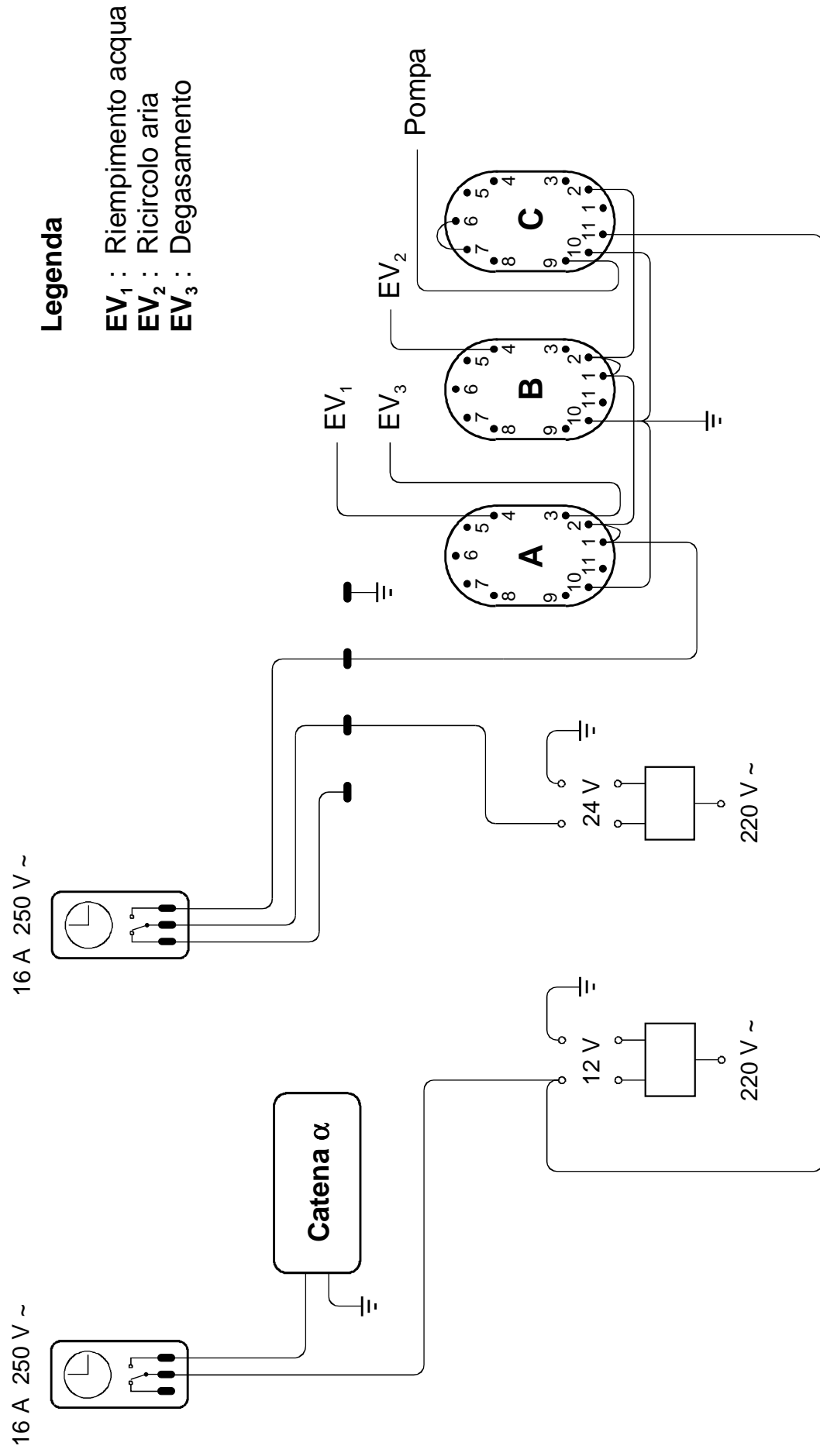


**Figura 4.4** - Schema idraulico del sistema  $\alpha$



**Figura 4.5** - Logica di attuazione

**Figura 4.6** - Schema elettrico del sistema  $\alpha$ .



Seguono alcune considerazioni sui tempi di ciclo.

Il tempo di ricircolo dell'acqua, fissato in 15', assicura circa 30 ricambi di acqua : infatti con una portata di circa 1 l/min vengono fatti fluire circa 15 l di acqua nel beaker da 0.507 l. La velocità dell'acqua nel tubo di scarico ( $\phi_{\text{interno}} = 5 \text{ mm}$ ) è pari a :

$$v = \frac{Q}{A} \cong \frac{0.001}{60 \cdot \pi \cdot \frac{0.005^2}{4}} \cong 0.85 \text{ m/s}$$

Il tempo di ricambio dell'aria nel contenitore in PVC, fissato in 7'20", assicura circa 10 ricambi di aria : infatti con una portata di circa 4 l/min vengono fatti fluire oltre 29 l di aria nel cilindro di volume utile 2.9 l.

Il tempo durante il quale viene fatta funzionare la pompa con l'elettrovalvola di rientro dell'aria chiusa, fissato in 1'20", permette di raggiungere un grado di vuoto nel cilindro in PVC dell'ordine di 0.6 atm. Questo probabilmente non consente di degassare completamente l'acqua contenuta nel beaker, infatti vengono fatti gorgogliare in essa soltanto  $0.6 \times 2.9 = 1.74 \text{ l}$  di aria, tuttavia tramite la procedura di calibrazione si può tenere conto di questa circostanza, come anche del piccolo "effetto memoria" tra cicli contigui dimostrato con la prova descritta in § 3.8.

Il tempo di degassamento, fissato in 10', permette il raggiungimento dell'equilibrio delle pressioni tra l'interno del cilindro in PVC e l'ambiente esterno a meno dell'altezza della colonna di acqua nel beaker di campionamento.

## 4.3. Strumentazione impiegata

### 4.3.1 Strumentazione elettrica impiegata

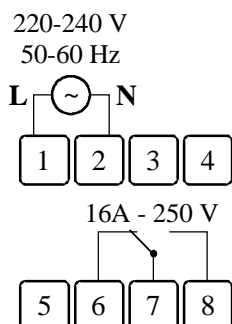
- *Alimentatore di bassa tensione LAMBDA Mod. ZWS50-24*

Alimentatore a telaio aperto, protetto da sovratensioni e sovracorrenti. Alimentabile con tensione compresa tra 85 e 265 V, fornisce 24 VDC.

- *Inseritore a tempo digitale VEMER Mod. TIME QRD*

Tutte le sue funzioni sono gestite da un microprocessore che garantisce un'elevata

affidabilità e una lunga durata nel tempo. Il programma giornaliero di commutazioni è memorizzato su memoria EEPROM, la risoluzione in fase di commutazione è di 1' (contro i 15' di un inseritore a tempo meccanico a 96 cavalierini).



Programmando il timer si fornisce l'ora in cui inizia la commutazione, ovvero quando nel nostro caso i 24 V sul morsetto 7 vengono forniti al morsetto 8 (posizione ON) e l'ora in cui i 24 V devono tornare disponibili sul morsetto 6 (posizione OFF). Le commutazioni possono essere al più 38 (19 ON e 19 OFF). Il timer è azionabile manualmente premendo un tasto specifico che inverte lo stato del relé.

- *Micropompa a membrana per gas KNF Mod. NMP 50* da 4 l/min, alimentata a 12 VDC
- *N° 2 elettrovalvole a 2 vie RS Tipo 439-060* (Cfr. § 2.5)
- *Elettrovalvola a 2 vie RS Tipo 439-278* (Cfr. § 3.5.2)
- *Relé temporizzati programmabili a due funzioni **RZEA***  
Ne sono impiegati due, contrassegnati con le lettere A e B nello schema elettrico in figura 4.6 (Cfr. § 3.5.2).
- *Relé temporizzato programmabile a due funzioni **GZU 30***  
Contrassegnato con la lettera C nello schema elettrico in figura 4.6 (Cfr. § 3.5.2).

#### 4.3.2. Strumentazione elettronica impiegata

- *Alimentatore di bassa tensione LAMBDA Mod. ZWS50-12*  
Alimentatore a telaio aperto, protetto da sovratensioni e sovracorrenti. Alimentabile

con tensione compresa tra 85 e 265 V, fornisce 12 VDC.

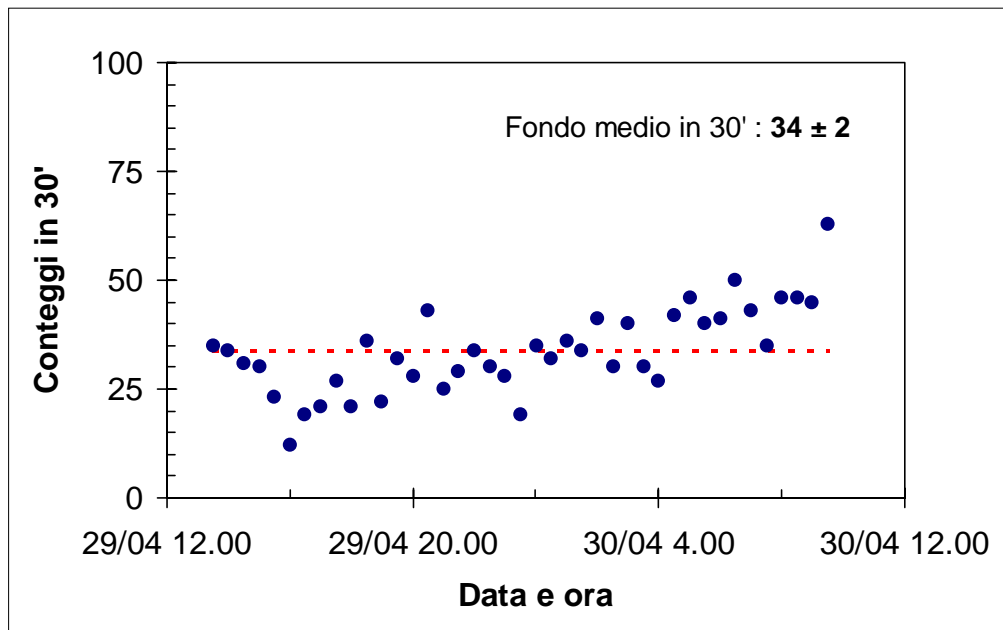
- *Inseritore a tempo digitale VEMER Mod. TIME QRD* (Cfr. § 4.3.1)  
Commuta i 12 V dell'alimentatore all'ingresso del convertitore DC/DC.
- *Convertitore DC/DC Traco TEM 10-1221* (Cfr. § 3.5.3)
- *Alimentatore di alta tensione HAMAMATSU Mod. C4710-51* (Cfr. § 3.5.3)
- *Partitore di tensione* (Cfr. § 3.4.1)
- *Fotomoltiplicatore HAMAMATSU Mod. R1306*
- *Signal Processing Module TESYS Mod. SPM 02* (Cfr. § 3.5.3)
- *Scheda analizzatore multicanale EG&G ORTEC MCB Type 916-002* (Cfr. § 2.5)

#### **4.4. Valutazione del fondo**

Poiché è stata utilizzata una nuova cella di Lucas si è proceduto alla valutazione del fondo. Si è ritenuto opportuno far ricircolare in circuito chiuso l'aria presente nel cilindro in PVC attraverso una colonna di carboni attivi per eliminare ogni impurità presente nella fase aeriforme. È stato ostruito l'ingresso al cilindro dell'aria proveniente dal degassamento ; altre due aperture sono state sfruttate per l'immissione dell'aria purificata proveniente da un tubo ad U contenente i carboni attivi e per la connessione all'aspirazione della pompa.

Dopo aver azionato la pompa per un tempo congruo, in modo da poter ritenere l'aria nel cilindro priva di radon, è stato avviato un ciclo di misure che si è protratto per 20 ore. Ogni misura ha avuto la durata di 1770 secondi e fra una misura e la successiva si è impostato un tempo di attesa di 30 secondi : questo per permettere al software di acquisizione di salvare spettri e reports relativi ad ogni misura senza perdere il sincronismo orario.

Il grafico riportato nella figura 4.7 mostra l'andamento dei conteggi di fondo per il sistema  $\alpha$ .



**Figura 4.7** - Andamento dei conteggi di fondo

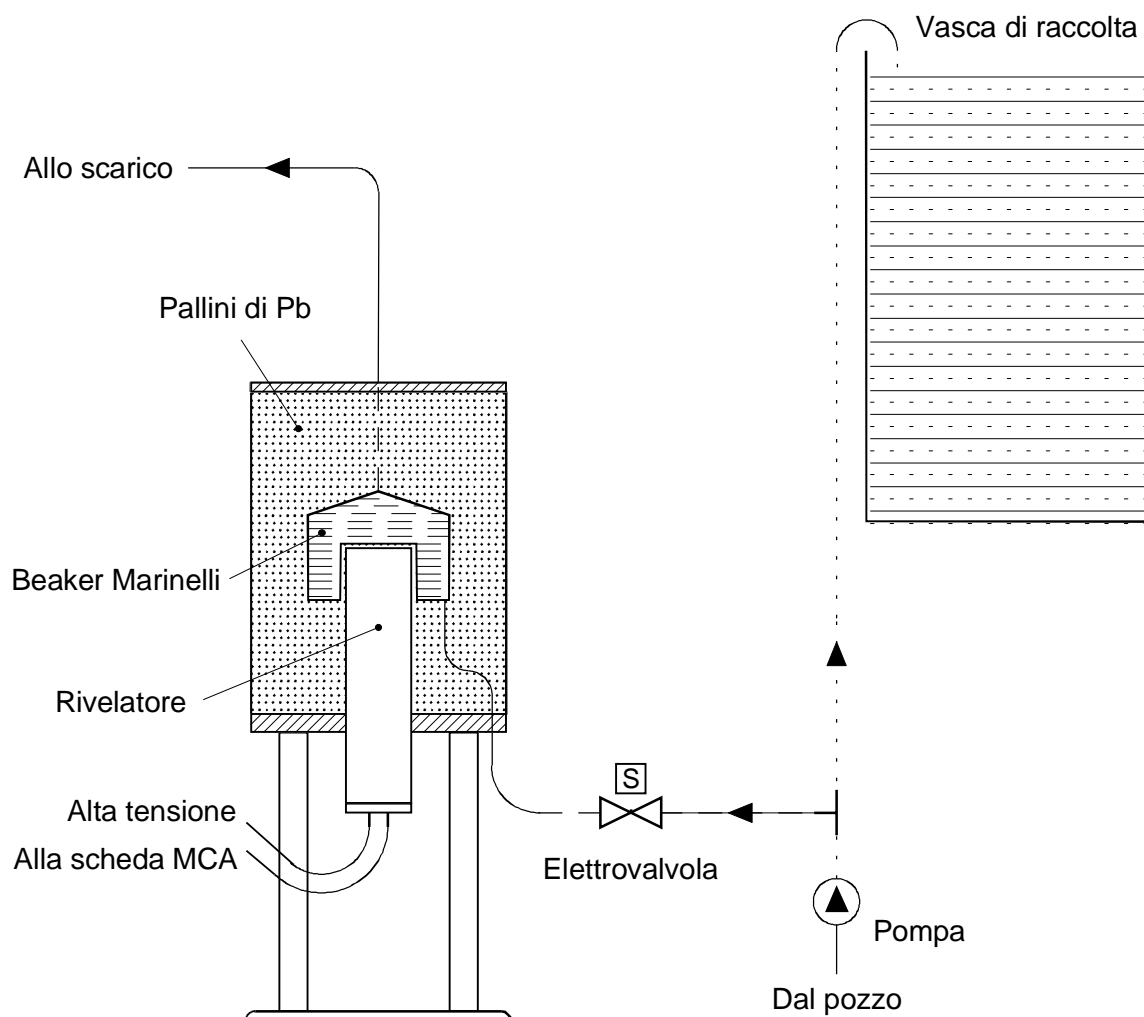
#### 4.5. Esito dei test di laboratorio sul sistema $\alpha$

Il sistema è stato ripetutamente provato in laboratorio ; sono stati effettuati cicli di misura relativamente brevi, a causa della limitata riserva di acqua arricchita disponibile. Non si è riscontrato alcun inconveniente e le modifiche apportate si sono dimostrate particolarmente efficaci. Pertanto verrà installato anch'esso presso il locale del centro ENEA di Frascati già citato in § 2.10 per un collaudo prolungato.

## 5. Collaudo del sistema per la misura “in continuo” della concentrazione di radon in acqua mediante spettrometria $\gamma$ presso il centro ENEA di Frascati

### 5.1. Generalità

Come anticipato in § 2.10 il sistema  $\gamma$  è stato istallato in un locale sito presso il centro ENEA di Frascati ; lo schema d’impianto è mostrato in figura 5.1

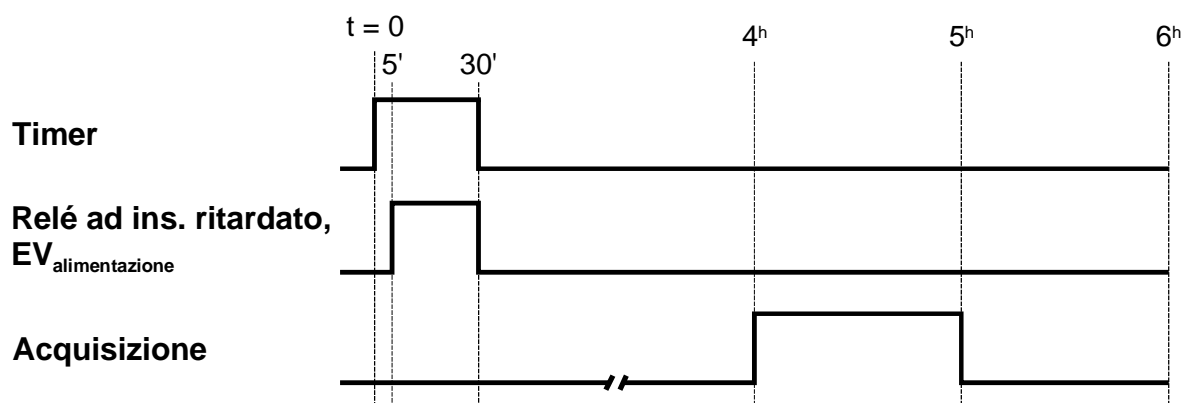


**Figura 5.1** - Schema del sistema di monitoraggio mediante spettrometria  $\gamma$

Con riferimento alla logica di attuazione in figura 5.2, il sistema elettrico è in grado di azionare la pompa del pozzo tramite un inseritore a tempo meccanico. Dopo 5 minuti un relé ad inserimento ritardato alimenta l'elettrovalvola che consente l'ingresso dell'acqua nel beaker Marinelli.

Il riempimento avviene dal basso ed il ricircolo dura per il tempo impostato dall'inseritore meccanico, che provvederà anche a disalimentare la pompa che preleva l'acqua dal pozzo.

La radiazione  $\gamma$  emessa dal campione d'acqua nel beaker Marinelli viene rivelata dopo oltre 3 ore, quando è praticamente raggiunto l'equilibrio secolare tra il radon e i suoi figli a breve  $T_{1/2}$ .



**Figura 5.2** - Logica di attuazione del sistema di monitoraggio mediante spettrometria  $\gamma$

In figura 5.3 è visibile la foto del sistema di monitoraggio proposto.





**Figura 5.3** - Sistema di monitoraggio mediante spettrometria  $\gamma$

## 5.2. Strumentazione impiegata

### 5.2.1 Strumentazione elettrica impiegata

- *Inseritore a tempo meccanico LEGRAND 497 54 Maxi Rex QT* (Cfr. 3.5.3)  
oppure  
*Inseritore a tempo meccanico VEMER Mod. ALPHA.*  
Motore passo-passo con oscillatore al quarzo, n° 1 quadranti di 24 ore, tempo minimo di intervento pari a 15 minuti (96 cavalierini), contatto in uscita : in scambio 16A 250VAC, grado di protezione IP20.
- *Elettrovalvola a 2 vie BÜRKERT da 1/2" alimentata a 220 V, potenza nominale della bobina : 8W, grado di protezione del connettore DIN : IP65, range di utilizzo : 1 ÷ 50 bar*
- *Relé temporizzato programmabile CROUZET Mod. 8734*

### 5.2.2. Strumentazione elettronica impiegata

- *Alimentatore di bassa tensione stabilizzato K.E.R.T. Mod. AT 2* (Cfr. § 2.5)
- *Convertitore DC/DC Traco Serie TEM 10 Ecoline* (Cfr. § 2.5)
- *Alimentatore di alta tensione HAMAMATSU Mod. C1309-52* (Cfr. § 2.5)
- *Preamplificatore e partitore di tensione TENNELEC Mod. TC 155A*
- *Fotomoltiplicatore HAMAMATSU Mod. R1306*
- *Scintillatore a NaI(Tl) da 2" × 2"*
- *Scheda analizzatore multicanale EG&G ORTEC MCB Type 916-002* (Cfr. § 2.5)  
oppure  
*Scheda analizzatore multicanale EG&G ORTEC  $\mu$ ACE*

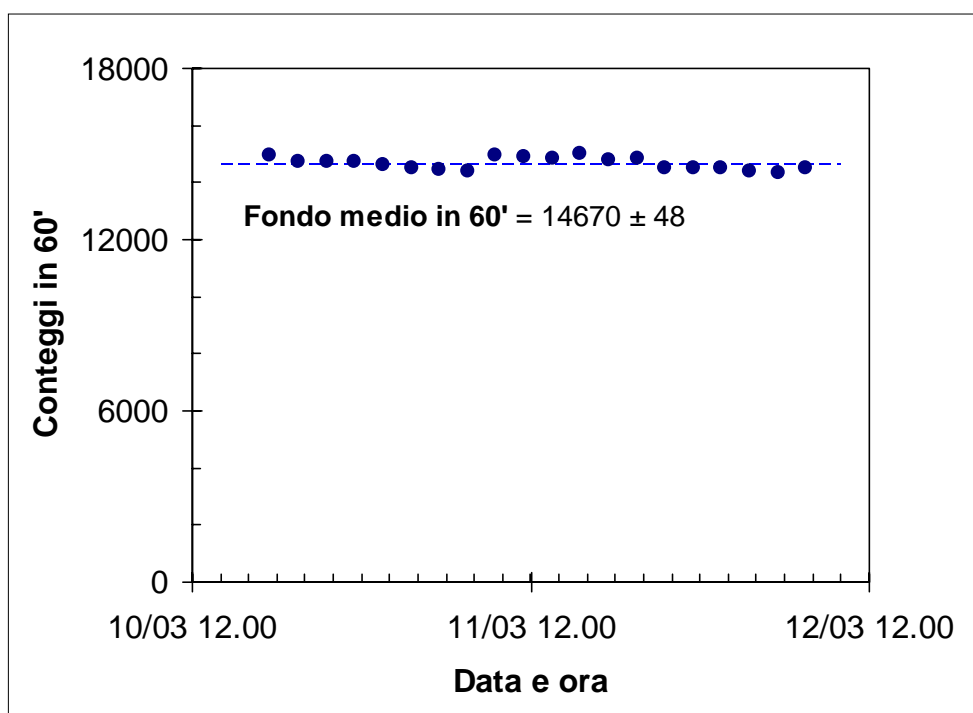
2048 canali. Software di gestione della scheda : MAESTRO Mod. A65-B32  
Versione 4.10. Programmazione del file di comando per la scheda multicanale ed elaborazione dei dati acquisiti : tramite software dedicato.

### 5.3. Valutazione del fondo

La concentrazione di radon si ottiene elaborando i conteggi netti ottenuti dai cicli di misura secondo la procedura illustrata in § 2.8. Occorre quindi avere una stima del fondo, dipendente dal luogo in cui è installato lo spettrometro e dalle condizioni di acquisizione.

Si è quindi riempito il beaker Marinelli del sistema di monitoraggio in continuo con acqua imbottigliata per un periodo abbastanza lungo ( $> 20$  giorni) e si è avviato un conteggio di 60'. Il valore ottenuto,  $14486 \pm 120$  conteggi, è relativo alla ROI che si estende dal picco del  $^{214}\text{Pb}$  a 242 keV al picco del  $^{214}\text{Bi}$  a 609 keV ed è stato utilizzato fino al 06/01/1999.

Per i cicli protrattisi dal 07/01/1999 al 29/03/1999 è stato invece utilizzato un valore di fondo ottenuto elaborando un ciclo di 20 misure effettuato con acqua priva di radon (figura 5.4).



**Figura 5.4** - Andamento dei conteggi di fondo. Scheda multicanale EG&G ORTEC  $\mu$ ACE

È stato necessario effettuare questa nuova misura del fondo poiché a causa di un guasto è stata sostituita la scheda multicanale : in luogo della scheda EG&G ORTEC MCB

Type 916-002 (2048 canali) è stata utilizzata la scheda EG&G ORTEC  $\mu$ ACE (2048 canali). Il cambiamento nella catena di conteggio si è ripercosso sullo spettro e quindi sui conteggi di fondo ottenuti.

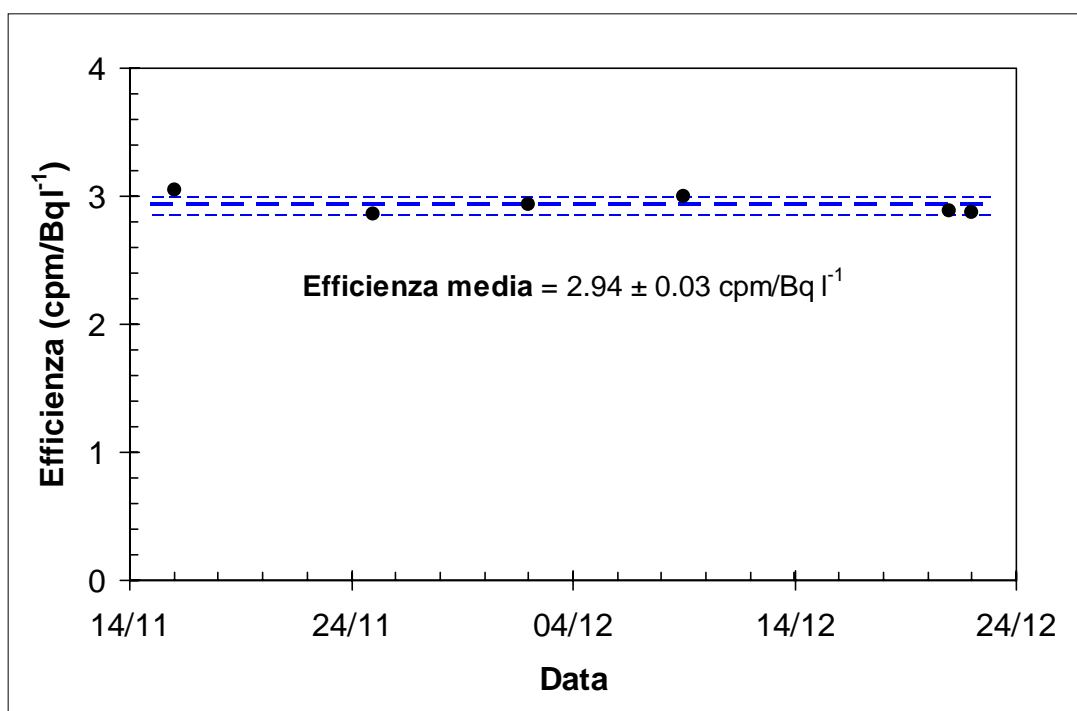
In base alle considerazioni di § 2.6 si è ottenuto un fondo pari a  $14670 \pm 48$  conteggi.

#### **5.4. Calibrazione del sistema $\gamma$**

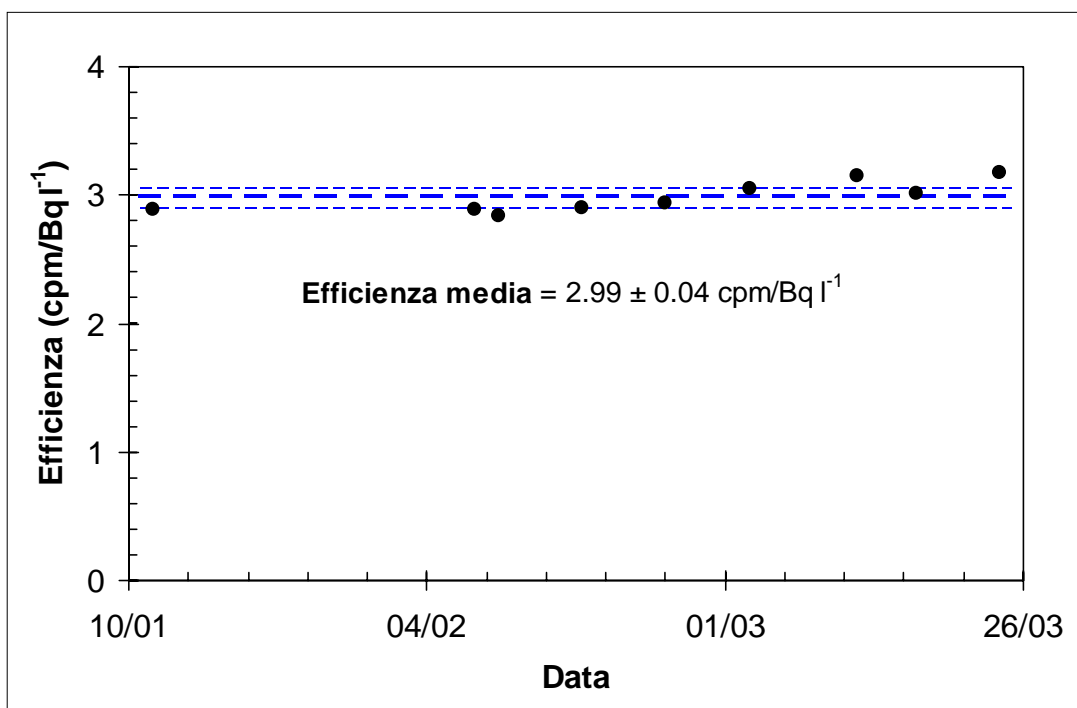
Il sistema  $\gamma$  è stato calibrato, nell'arco dei mesi di test, in corrispondenza dell'avvio di ogni ciclo di misure per verificarne la stabilità della risposta. Questa è una caratteristica auspicabile per uno strumento ideato per essere utilizzato in una stazione fissa di monitoraggio in quanto se fosse riscontrata eviterebbe interventi troppo frequenti da parte dell'operatore: al limite si dovrebbe poter usare il valore di efficienza ottenuto in occasione del collaudo del sistema. L'efficienza di conteggio è stata ricavata di volta in volta confrontando il valore dei conteggi netti con la concentrazione di radon ad essi relativa applicando la procedura descritta in § 2.7.1. Tale valore di concentrazione è stato determinato facendo fluire l'acqua in uscita dal beaker Marinelli del sistema nella bottiglia da 0.6 l utilizzata dall'unità di degassamento portatile descritta negli allegati B ed E: il radon è trasferito in un canestro a carboni attivi che viene successivamente misurato in laboratorio.

Nelle figure 5.5 e 5.6 sono riportati gli andamenti dell'efficienza di conteggio relativi alle due schede multicanale EG&G ORTEC usate. In ognuno dei grafici sono tracciate le rette che individuano il valore medio dell'efficienza e le rette che delimitano la fascia al livello di confidenza del 95%. L'errore riportato accanto al valore medio è invece al livello di confidenza del 68%.

Si può notare come i valori si mantengano sufficientemente vicini alla loro media, discostandosene nel caso peggiore per meno del 7%; questo ci consente di poter ragionevolmente considerare la risposta del sistema stabile nel tempo. Tuttavia si è notata una crescita dei valori nel mese di marzo, pertanto sarà opportuno verificare nel seguito se la risposta del sistema non risenta di un effetto di temperatura.




**Figura 5.5** - Andamento dell'efficienza nel tempo (scheda EG&G ORTEC Type 916-002)



**Figura 5.6** - Andamento dell'efficienza nel tempo (scheda EG&G ORTEC μACE)

In tabella 5.1 sono riportati i valori di efficienza, del limite inferiore di rivelazione e della minima attività rivelabile per entrambe le schede multicanale impiegate.

	Beaker Marinelli da 0.69 l in spettrometro $\gamma$			
				
	MCB Type 916-002		$\mu$ ACE	
	valore	$\sigma$	valore	$\sigma$
Fondo	14486	120	14670	48
Efficienza (cpm/Bq l <sup>-1</sup> )	2.936	0.075	2.986	0.121
LLD (cpm)	6.02	0.03	6.06	0.01
MDA (Bq/l)	2.05	0.05	2.03	0.08

**Tabella 5.1** - Parametri caratteristici del sistema  $\gamma$  per un tempo di acquisizione di 60'

## 5.5. Risultati ottenuti

In figura 5.7 è riportato l'andamento della concentrazione di radon nell'acqua del pozzo nel periodo compreso dal novembre 1998 al gennaio 1999. La scheda multicanale utilizzata per l'acquisizione è la EG&G ORTEC MCB Type 916-002. Si può notare come nel corso delle prime prove sia emersa la necessità di variare il tempo per cui l'acqua viene ricambiata nel beaker Marinelli : i picchi sono infatti relativi ad acquisizioni su campioni di acqua prelevati in corrispondenza ad un funzionamento più prolungato della pompa ; l'acqua del pozzo non è infatti asservita esclusivamente al sistema di monitoraggio in continuo. Da prove effettuate si è visto che la concentrazione di radon nell'acqua cresce fino a circa 30 minuti di funzionamento della pompa.

La figura 5.8 è relativa alle acquisizioni con la scheda multicanale EG&G ORTEC  $\mu$ ACE, protrattesi da gennaio a marzo 1999.

In entrambi i grafici sono stati ricordati i motivi che hanno causato temporanee assenze di dati ; in particolare nella scheda EG&G ORTEC MCB Type 916-002 è stato sostituito un circuito ibrido danneggiato ed è stata restituita dopo circa 2 mesi.

Ogni dato nei grafici è inoltre ottenuto basandosi sull'efficienza relativa al ciclo di misure a cui appartiene. Proseguendo nella sperimentazione del sistema di monitoraggio in diverse condizioni ambientali si valuterà la necessità di procedere a calibrazioni più o meno frequenti.

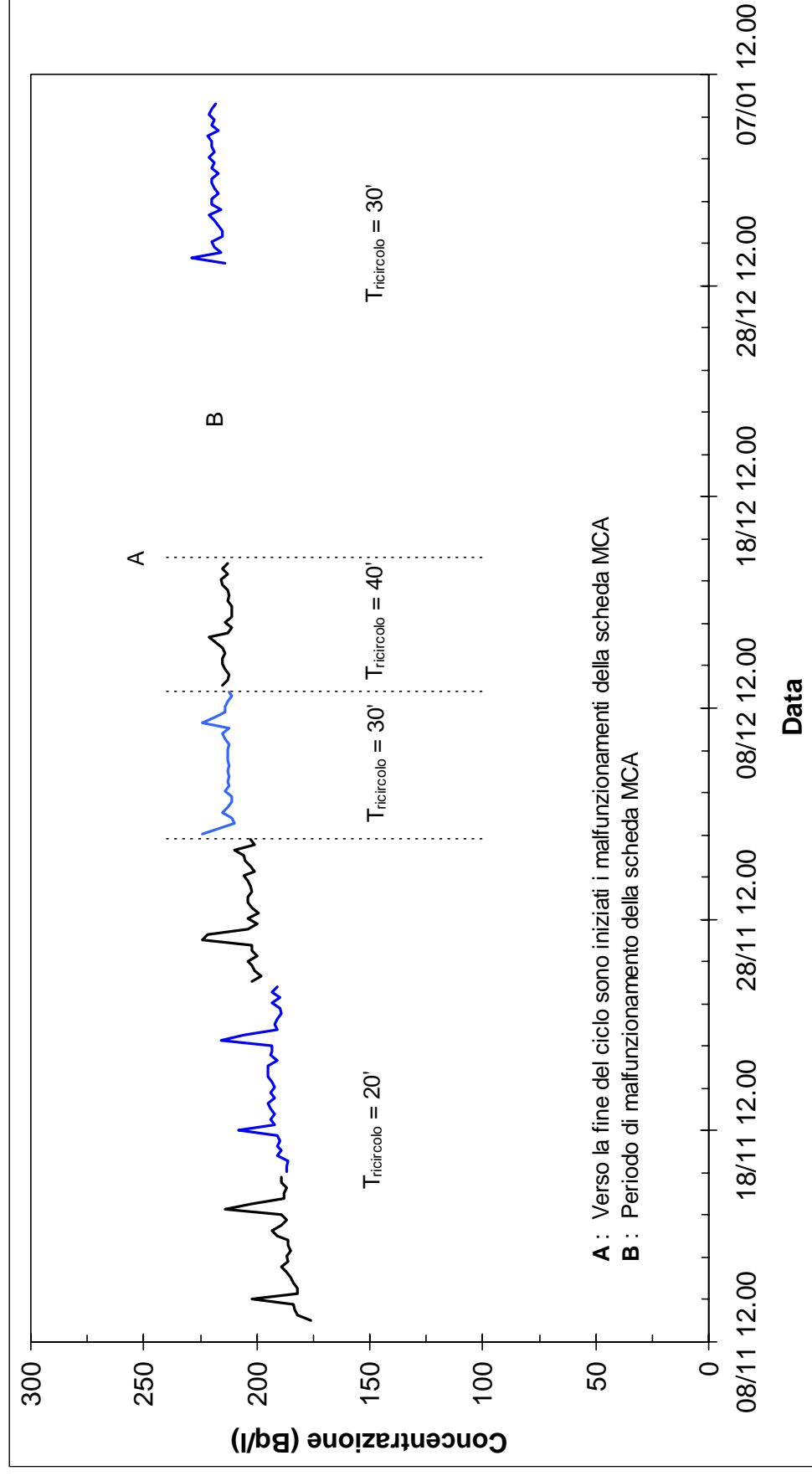
## **5.6. Stabilità della risposta**

L'analisi dei valori di efficienza ha mostrato un soddisfacente grado di stabilità della risposta del sistema, almeno relativamente agli scostamenti dei singoli valori dalla media. Una ulteriore analisi può essere condotta sulla base della posizione dei picchi (relativi alle emissioni  $\gamma$  rivelate) negli spettri acquisiti durante i vari mesi. Uno spostamento dei picchi di un numero di canali significativo implicherebbe ad esempio derive dell'alta tensione.

Sono stati quindi analizzati alcuni spettri scelti casualmente fra quelli acquisiti in questa prima fase e sembra che nel tempo i picchi si mantengano allineati. La ROI selezionata inizialmente ha continuato ad essere valida anche per le acquisizioni successive.

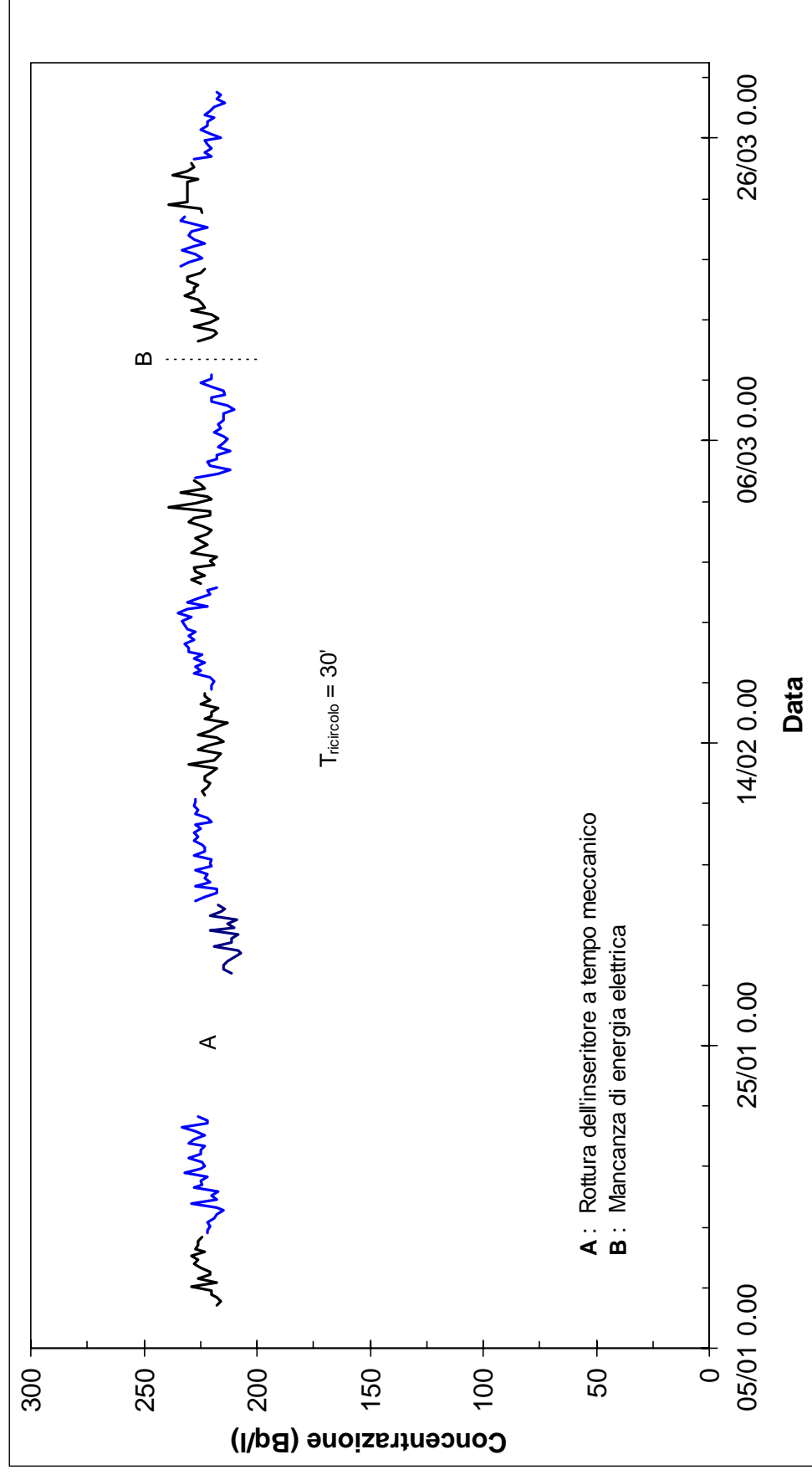
Sono stati analizzati spettri acquisiti con entrambe le schede multicanale impiegate (figure 5.9 e 5.10) ; le ROI nei due casi sono ovviamente diverse a causa della peculiarità dell'elettronica che le equipaggia : nel primo caso la ROI va dal canale 54 al canale 160, nel secondo dal canale 118 al 308.

Nei vari spettri si è riscontrata una certa costanza della posizione dei picchi del  $^{214}\text{Pb}$  e del  $^{214}\text{Bi}$ . Inoltre si è valutato che una traslazione dello spettro di 3 canali comporta un errore dell'ordine del 2% qualora non si alteri anche la ROI iniziale ; errore ritenuto accettabile.

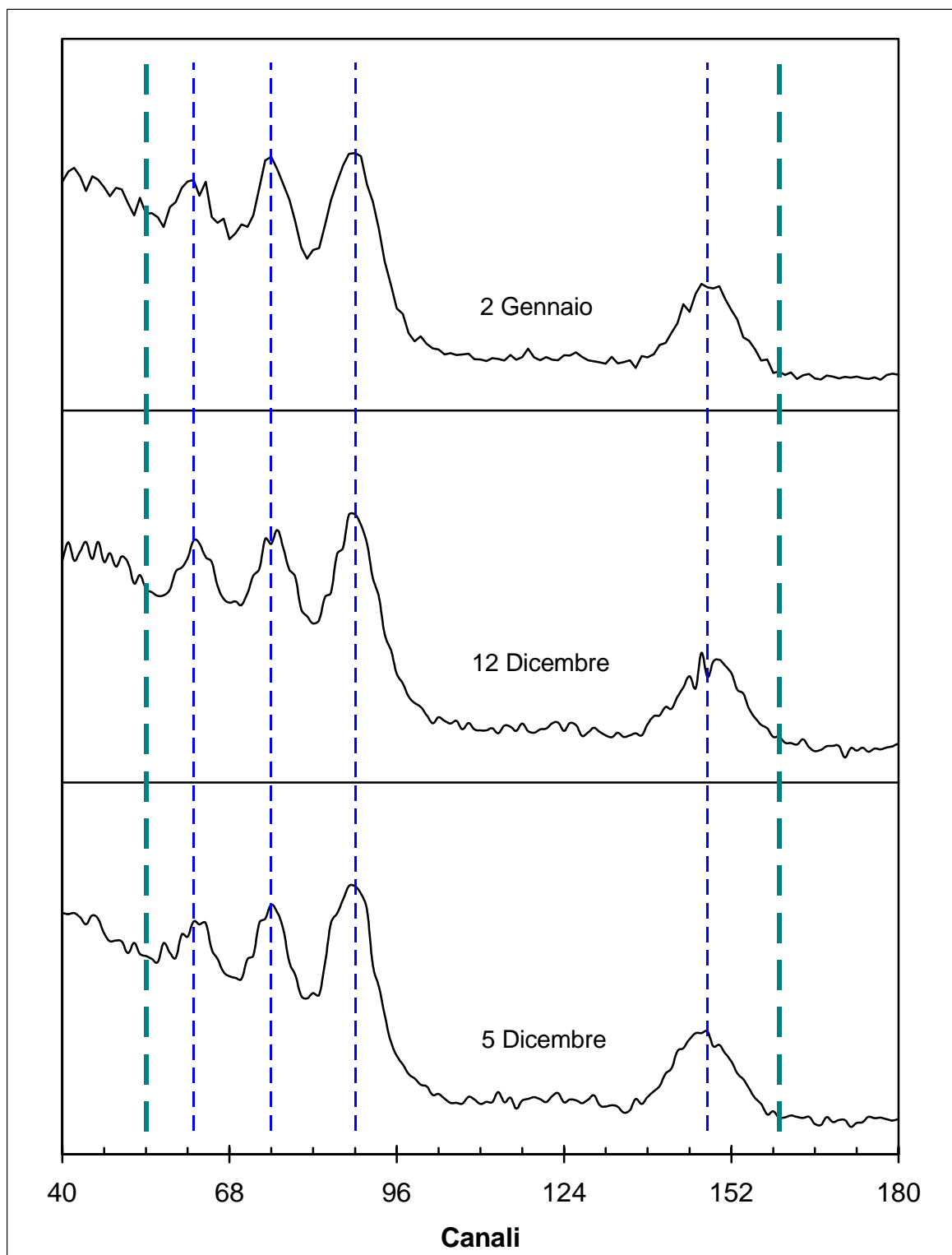


**Figura 5.7** - Andamento della concentrazione di radon nelle acque del pozzo sito presso il centro ENEA di Frascati. Misure dal 09/11/1998 al 06/01/1999.

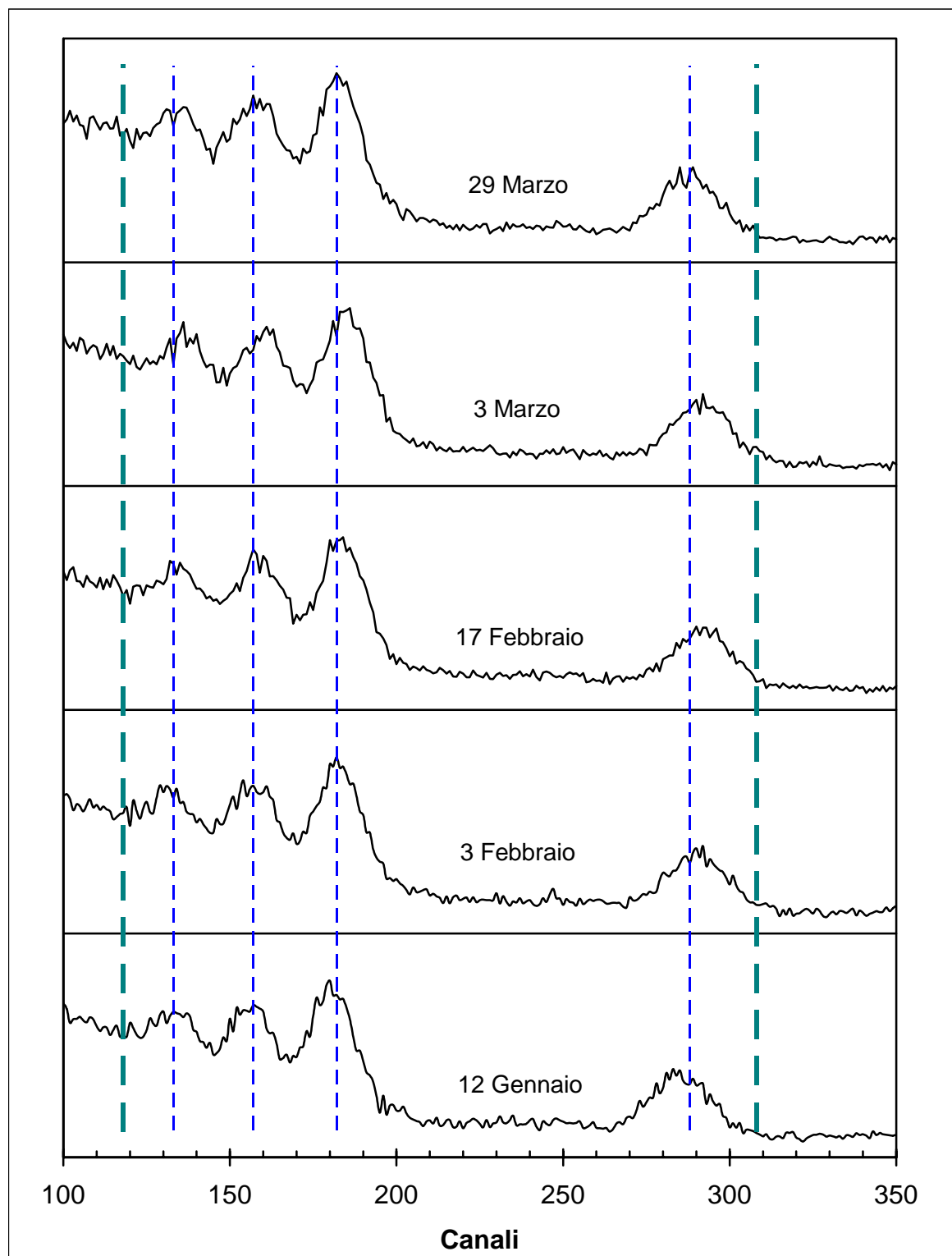




**Figura 5.8** - Andamento della concentrazione di radon nelle acque del pozzo sito presso il centro ENEA di Frascati. Misure dal 07/01/1999 al 29/03/1999.



**Figura 5.9** - Stabilità nella risposta della scheda ORTEC MCB Type 916-002



**Figura 5.10** - Stabilità nella risposta della scheda ORTEC  $\mu$ ACE

## **6. Collaudo dei sistemi per la misura “in continuo” della concentrazione di radon in acqua mediante spettrometria $\gamma$ e cella a scintillazione presso il centro ENEA di Frascati**

### **6.1. Generalità**

Nel maggio 1999 il sistema di monitoraggio  $\alpha$  descritto nel capitolo 4 è stato affiancato al sistema  $\gamma$  già in funzione presso il centro ENEA di Frascati [11].

L'acqua fluisce attraverso i dispositivi di campionamento dei due sistemi non più in serie, come riportato nello schema di figura 3.5, bensì in parallelo in modo da rendere agevole l'eventuale disattivazione di uno dei due. Gli schemi idraulico ed elettrico sono mostrati nelle figure 6.1 e 6.2.

L'inseritore a tempo digitale che nello schema di figura 4.6 gestiva esclusivamente l'alimentazione della catena di conteggio  $\alpha$ , ora provvede alla commutazione dell'alimentazione dei due sistemi. In particolare nella posizione ON i 12 V forniti dall'alimentatore LAMBDA Mod. ZWS50-12 sono commutati internamente sul modulo di alta tensione del sistema  $\alpha$ , nella posizione OFF sono commutati esternamente sul modulo di alta tensione del sistema  $\gamma$  (l'alimentatore di bassa tensione KERT non è più necessario).

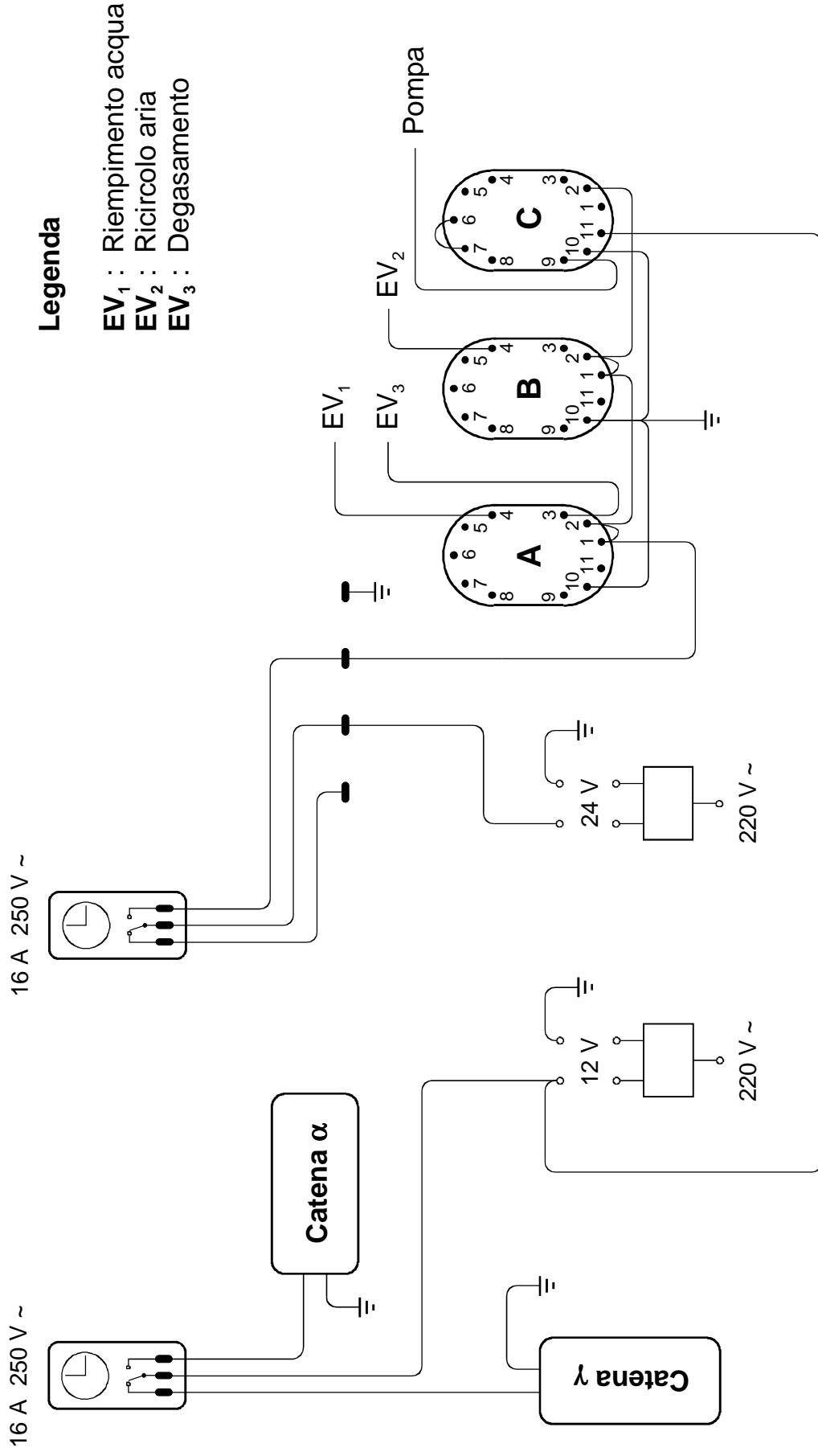
La logica di attuazione dei due sistemi è nello schema in figura 6.3. La pompa che preleva l'acqua dal pozzo viene sempre azionata per 30' ogni 6 ore ; i tempi relativi alle varie fasi in cui si articola un ciclo del sistema  $\alpha$  sono quelli indicati nello schema di figura 4.5.

Per la particolare disposizione d'impianto dei due sistemi è di fondamentale importanza che l'elettrovalvola  $EV_1$ , comandata dal relé A, si chiuda prima della commutazione in posizione ‘basso’ dell'inseritore a tempo meccanico : altrimenti il beaker del sistema  $\alpha$  si svuoterebbe attraverso il beaker Marinelli del sistema  $\gamma$ .

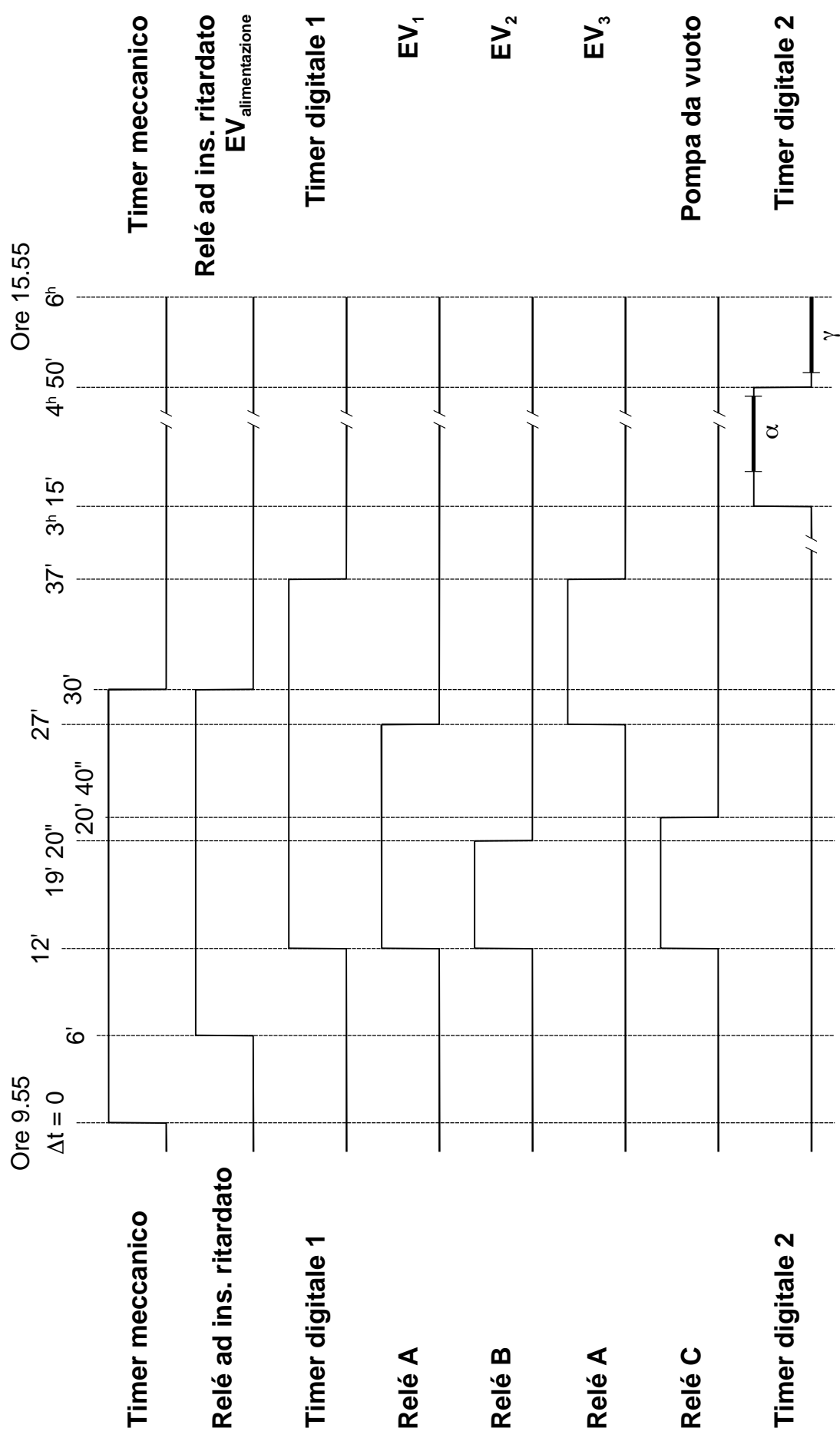
In figura 6.4 è visibile la foto del sistema combinato  $\alpha - \gamma$  di monitoraggio.



**Figura 6.2** - Schema elettrico del sistema di monitoraggio mediante spettrometria  $\gamma$  e scintillazione  $\alpha$



**Figura 6.3** - Logica di attuazione del sistema di monitoraggio  
mediante spettrometria  $\gamma$  e scintillazione  $\alpha$





**Figura 6.4** - Sistema di monitoraggio mediante spettrometria  $\gamma$  e scintillazione  $\alpha$



## 6.2. Strumentazione impiegata

### 6.2.1 Strumentazione elettrica impiegata

- *Inseritore a tempo meccanico VEMER Mod. ALPHA* (Cfr. § 5.2.1)
- *Elettrovalvola a 2 vie BÜRKERT da 1/2"* (Cfr. § 5.2.1)
- *Relé temporizzato programmabile CROUZET Mod. 8734*
- *Alimentatore di bassa tensione LAMBDA Mod. ZWS50-24* (Cfr. § 4.3.1)
- *Inseritore a tempo digitale VEMER Mod. TIME QRD* (Cfr. § 4.3.1)
- *Micropompa a membrana per gas KNF Mod. NMP 50* (Cfr. § 4.3.1)
- *N° 2 elettrovalvole a 2 vie RS Tipo 439-060* (Cfr. § 2.5)
- *Elettrovalvola a 2 vie RS tipo 439-278* (Cfr. § 3.5.2)
- *Relé temporizzati programmabili a due funzioni RZEA*  
Ne sono impiegati due, contrassegnati con le lettere A e B nello schema elettrico in figura 6.2 (Cfr. § 3.5.2).
- *Relé temporizzato programmabile a due funzioni GZU 30*  
Contrassegnato con la lettera C nello schema elettrico in figura 6.2 (Cfr. § 3.5.2).

### 6.2.2. Strumentazione elettronica impiegata

#### Strumentazione elettronica del sistema $\gamma$

- *Alimentatore di bassa tensione LAMBDA Mod. ZWS50-12* in comune con il sistema  $\alpha$  (Cfr. § 4.3.2)
- *Convertitore DC/DC Traco Serie TEM 10 Ecoline* (Cfr. § 2.5)
- *Alimentatore di alta tensione HAMAMATSU Mod. C1309-52* (Cfr. § 2.5)
- *Preamplificatore e partitore di tensione TENNELEC Mod. TC 155A*
- *Fotomoltiplicatore HAMAMATSU Mod. R1306*
- *Scintillatore a NaI(Tl) da 2"  $\times$  2"*

- *Scheda analizzatore multicanale EG&G ORTEC  $\mu$ ACE* in comune con il sistema  $\alpha$  (Cfr. § 5.2.2)

#### Strumentazione elettronica del sistema $\alpha$

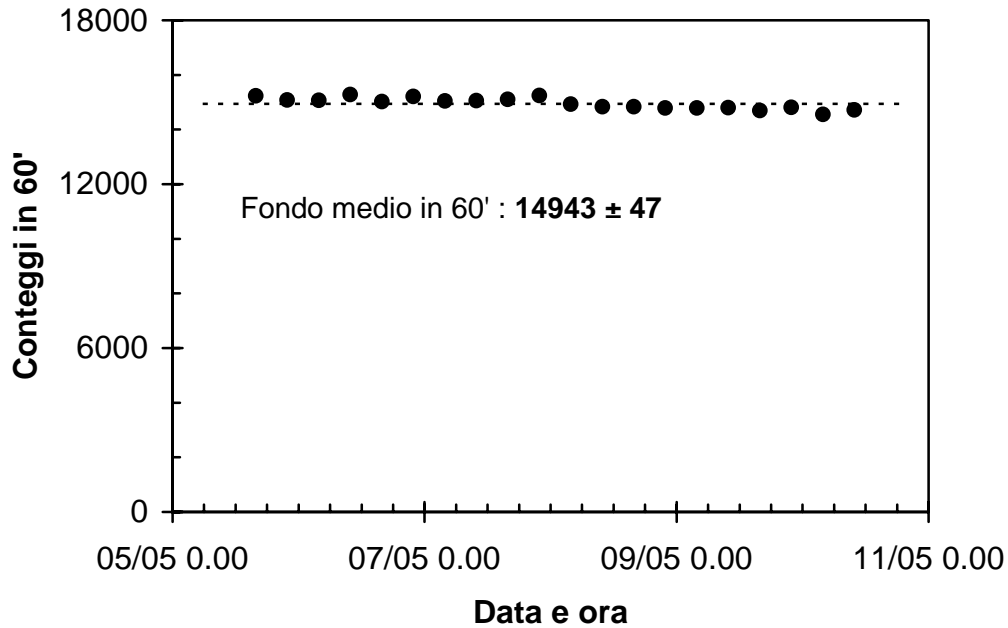
- *Alimentatore di bassa tensione LAMBDA Mod. ZWS50-12* in comune con il sistema  $\gamma$  (Cfr. § 4.3.2)
- *Inseritore a tempo digitale VEMER Mod. TIME QRD* (Cfr. § 4.3.1)
- *Convertitore DC/DC Traco TEM 10-1221* (Cfr. § 3.5.3)
- *Alimentatore di alta tensione HAMAMATSU Mod. C4710-51* (Cfr. § 3.5.3)
- *Partitore di tensione* (Cfr. § 3.4.1)
- *Fotomoltiplicatore HAMAMATSU Mod. R1306*
- *Signal Processing Module TESYS Mod. SPM 02* (Cfr. § 3.5.3)
- *Scheda analizzatore multicanale EG&G ORTEC  $\mu$ ACE* in comune con il sistema  $\gamma$  (Cfr. § 5.2.2)

### **6.3. Valutazione del fondo**

Per il fondo relativo al sistema  $\alpha$  si ritiene valido quanto affermato in § 4.4. Pertanto, per un'ora di acquisizione si considera un fondo medio di  $69 \pm 4$  conteggi.

Alcune prove effettuate con i sistemi  $\alpha$  e  $\gamma$  in parallelo hanno evidenziato una contrazione dello spettro  $\gamma$  rispetto alla configurazione con il solo sistema  $\gamma$  in funzione. Per una nuova valutazione del fondo si è avviato un ciclo di misure riempiendo il beaker Marinelli con acqua imbottigliata da lungo tempo. Gli spettri acquisiti sono stati elaborati integrando su una ROI che si estende dal canale 118 al canale 265, adeguatamente contratta rispetto alla precedente (canali  $118 \div 308$ ).

In figura 6.5 è riportato l'andamento dei conteggi relativi alla prova di fondo ; la retta tratteggiata individua il valor medio che identificheremo con il fondo cercato. In base alle considerazioni di § 2.6 si è ottenuto un fondo pari a  $14943 \pm 47$  conteggi in 60'.



**Figura 6.5** - Andamento dei conteggi di fondo relativi al sistema  $\gamma$

#### 6.4. Calibrazione dei sistemi $\alpha$ e $\gamma$

Si è seguita la procedura descritta in § 3.7 con l'ausilio dell'unità di degassamento portatile. I sistemi sono stati calibrati in corrispondenza dell'avvio di ogni ciclo di misure ottenendo i dati in tabella 6.1, riportati anche nelle figure 6.6 e 6.7.

Nel grafico in figura 6.6 sono tracciate le rette che individuano il valore medio dell'efficienza e le rette che delimitano la fascia al livello di confidenza del 95%. L'errore riportato accanto al valore medio è invece al livello di confidenza del 68%.

In figura 6.7 sono stati tracciati per completezza anche i valori di efficienza ottenuti con il solo sistema  $\gamma$  in funzione (cerchi vuoti).

Dalle prove di calibrazione effettuate si è potuto riscontrare che l'andamento dell'efficienza di conteggio del sistema  $\gamma$  non varia casualmente nell'intorno del suo valor medio : si è ritenuto pertanto opportuno calcolare valori medi stagionali basandosi, per la stagione fredda, anche sui dati acquisiti con il solo sistema  $\gamma$  in funzione. Tale fenomeno è stato attribuito alla maggiore sensibilità a variazioni di temperatura del sistema *scintillatore a NaI(Tl) - fotomoltiplicatore* rispetto al sistema *cella a scintillazione - fotomoltiplicatore*

Sono stati quindi dedotti i valori medi stagionali dell'efficienza del sistema  $\gamma$  :

Stagione fredda :  $\text{Eff}_\gamma = 2.96 \pm 0.08 \text{ cpm/Bq l}^{-1}$

Stagione temperata :  $\text{Eff}_\gamma = 3.22 \pm 0.06 \text{ cpm/Bq l}^{-1}$

Stagione calda :  $\text{Eff}_\gamma = 3.39 \pm 0.06 \text{ cpm/Bq l}^{-1}$

da cui si è ottenuto il valore medio annuale pesato dell'efficienza del sistema  $\gamma$  :

$$\text{Eff}_\gamma = 3.22 \pm 0.04 \text{ cpm/Bq l}^{-1}$$

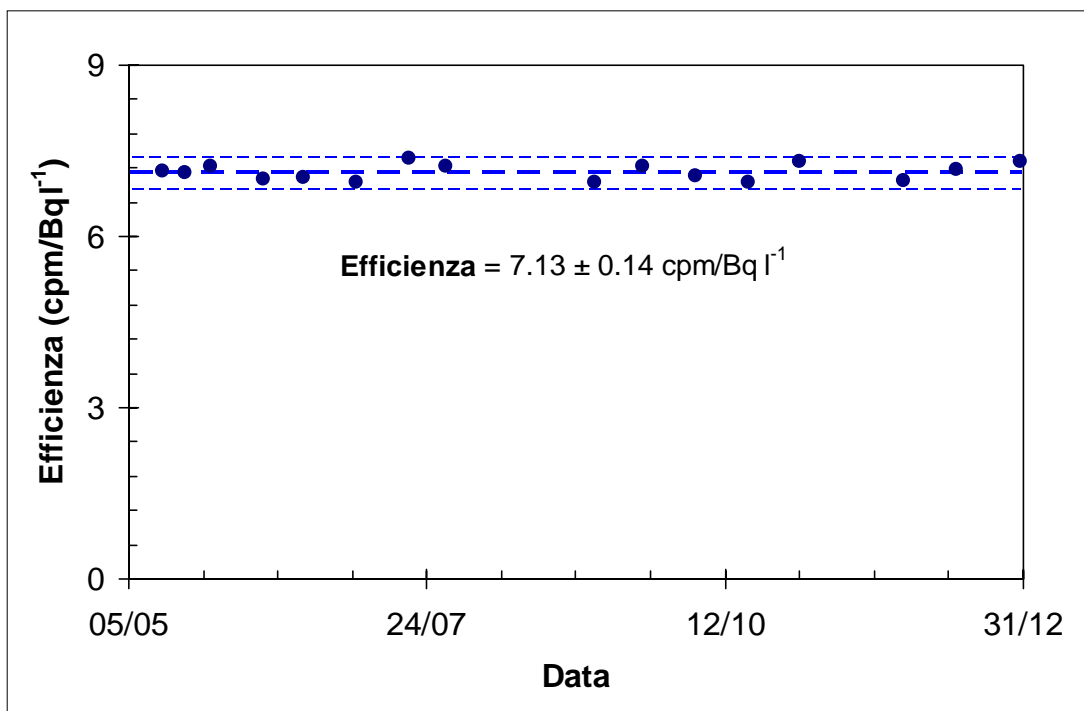
L'efficienza del sistema  $\alpha$  al contrario si è dimostrata molto stabile al variare delle condizioni ambientali, pertanto il suo valor medio :

$$\text{Eff}_\alpha = 7.13 \pm 0.14 \text{ cpm/Bq l}^{-1}$$

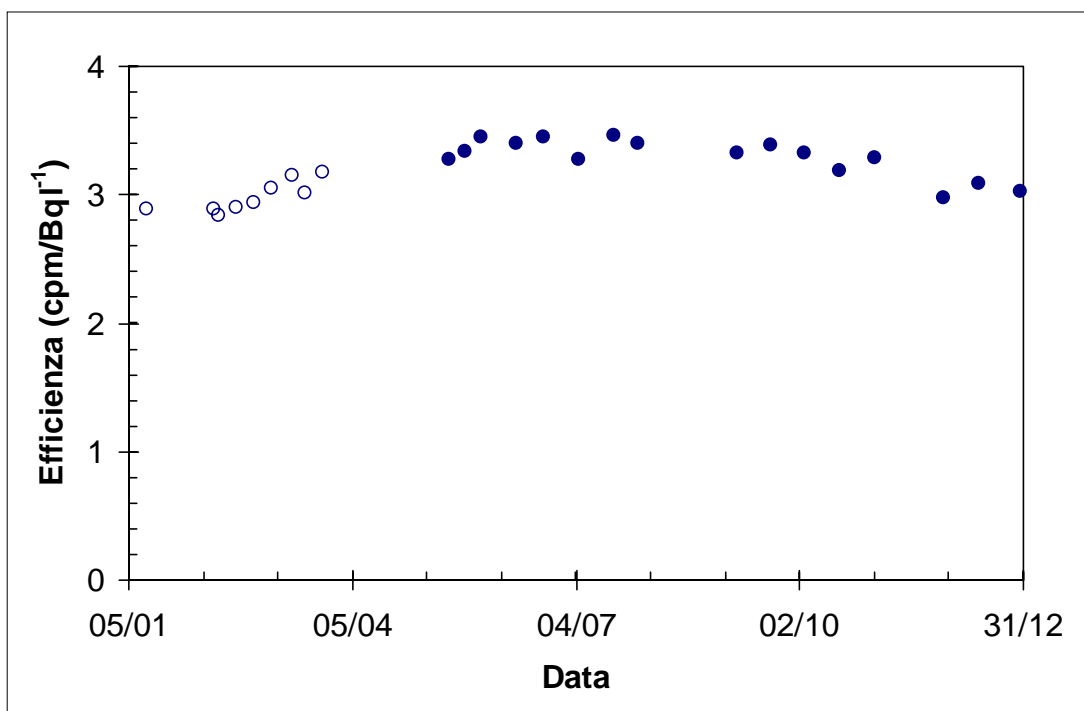
potrà essere impiegato per elaborare i dati acquisiti nel corso di un ciclo di misure laddove non si disponga di una calibrazione specifica.

Data calibrazione	Efficienza (cpm/Bq l <sup>-1</sup> )	
	Beaker Marinelli	Cella di Lucas
14/05/1999	3.2727 ± 0.0822	7.1504 ± 0.1754
20/05/1999	3.3351 ± 0.0836	7.1155 ± 0.1744
27/05/1999	3.4539 ± 0.0851	7.2204 ± 0.1741
10/06/1999	3.4077 ± 0.0836	7.0106 ± 0.1686
21/06/1999	3.4555 ± 0.0852	7.0456 ± 0.1705
05/07/1999	3.2820 ± 0.0805	6.9581 ± 0.1671
19/07/1999	3.4693 ± 0.0851	7.3602 ± 0.1769
29/07/1999	3.4053 ± 0.0837	7.2379 ± 0.1741
07/09/1999	3.3270 ± 0.0818	6.9581 ± 0.1674
20/09/1999	3.3945 ± 0.0836	7.2379 ± 0.1746
04/10/1999	3.3215 ± 0.0826	7.0630 ± 0.1716
18/10/1999	3.1926 ± 0.0799	6.9407 ± 0.1693
01/11/1999	3.2838 ± 0.0819	7.3078 ± 0.1777
29/11/1999	2.9842 ± 0.0747	6.9756 ± 0.1697
13/12/1999	3.0898 ± 0.0775	7.1854 ± 0.1753
30/12/1999	3.0232 ± 0.0752	7.3078 ± 0.1748

**Tabella 6.1** - Valori di efficienza ottenuti durante il funzionamento in parallelo dei sistemi di monitoraggio  $\alpha$  e  $\gamma$



**Figura 6.6** - Andamento dell'efficienza di conteggio del sistema di monitoraggio  $\alpha$



**Figura 6.7** - Andamento dell'efficienza di conteggio del sistema di monitoraggio  $\gamma$



## **6.5. Considerazioni sui valori di MDA per i sistemi $\alpha$ e $\gamma$ installati in una stazione di monitoraggio**

Come noto la minima attività rivelabile dipende dal limite inferiore di rivelazione (cpm), e quindi dal valore di fondo, e dall'efficienza di conteggio (cpm/Bq l<sup>-1</sup>) relativi al sistema di monitoraggio considerato.

L'influenza del radon contenuto nell'aria dell'ambiente in cui sono installati i due sistemi è relativamente ridotta nel caso del sistema  $\gamma$ , in virtù della sua struttura, mentre può essere significativa nel caso del sistema  $\alpha$  poiché aria ambiente è usata per il ricambio dell'aria nel cilindro in PVC e per il degassamento del campione di acqua : ecco quindi che la MDA per il sistema  $\alpha$  può dipendere fortemente dalla concentrazione di radon in aria (per la cella di Lucas impiegata nel sistema  $\alpha$  si hanno circa 2.5 cph/Bq m<sup>-3</sup> di radon in aria). Va comunque ricordato che il prelievo dell'aria può essere fatto all'aperto, ove la concentrazione di radon è notoriamente bassa, e non necessariamente al chiuso nel locale che ospita la stazione di monitoraggio. Pertanto il contributo del radon nell'aria può essere reso trascurabile anche nel caso del sistema  $\alpha$ .

Al contrario di quanto riscontrato per il sistema  $\alpha$ , il valore di efficienza di conteggio del sistema  $\gamma$  ha evidenziato fluttuazioni stagionali (Cfr. § 6.4). Ciò si ripercuote ovviamente sulla MDA del sistema  $\gamma$ , per cui si suggerisce di considerare un valore medio stagionale ; un valore di MDA medio annuo dovrebbe essere ottenuto come media pesata dei valori medi stagionali.

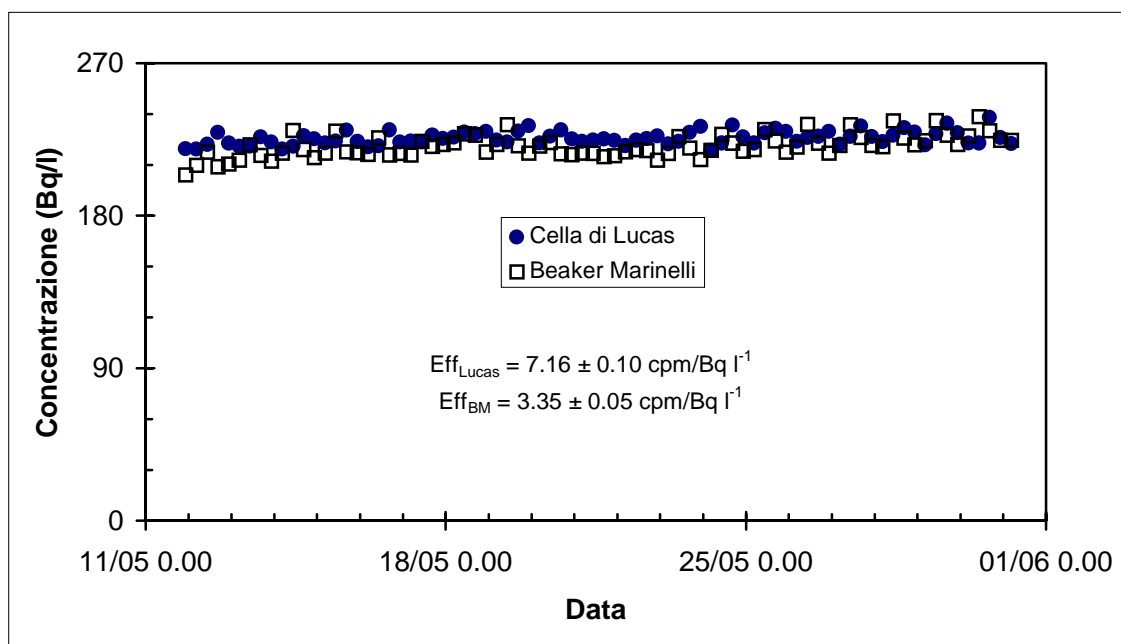
Basandoci sui dati acquisiti nel corso della sperimentazione dei sistemi di monitoraggio presso il centro ENEA di Frascati, in tabella 6.2 sono riportati i valori di efficienza, LLD e MDA medi annui.

	Beaker Marinelli		Cella di Lucas
			
	valore	$\sigma$	valore
Fondo	14943	47	> 69
Efficienza (cpm/Bq l <sup>-1</sup> )	3.22	0.04	7.13 ± 0.14
LLD (cpm)	6.11	0.01	> 0.42
MDA (Bq/l)	1.90	0.02	> 0.06

**Tabella 6.2** - Efficienza, LLD e MDA medi annui relativi ai sistemi di monitoraggio  $\alpha$  e  $\gamma$  (tempo di acquisizione pari a 60')

## 6.6. Andamento della concentrazione di radon nell'acqua del pozzo di Frascati

Le figure e tabelle seguenti si riferiscono ai dati relativi all'andamento della concentrazione di radon in acqua acquisiti durante il periodo di sperimentazione dei sistemi  $\alpha$  e  $\gamma$  di monitoraggio in continuo presso il centro ENEA di Frascati.

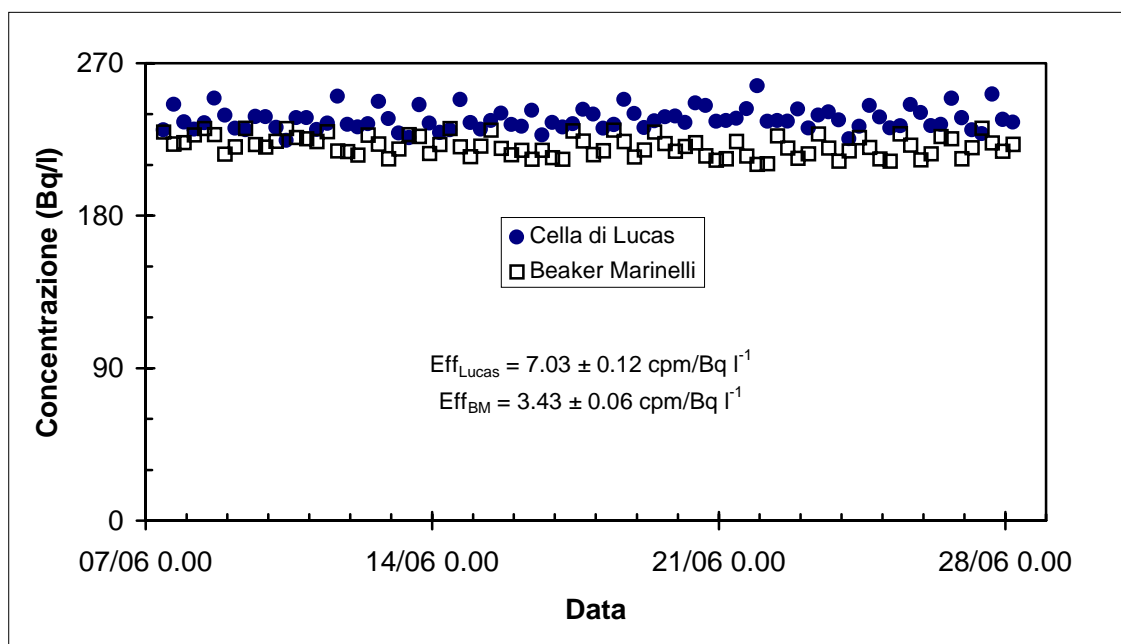


**Figura 6.8** - Andamento della concentrazione di radon in acqua dal 11/05 al 31/05

Data e ora	C <sub>Rn</sub> (Bq/l)		Data e ora	C <sub>Rn</sub> (Bq/l)		Data e ora	C <sub>Rn</sub> (Bq/l)	
	Lucas	BM		Lucas	BM		Lucas	BM
11/05 22.30	219	204	18/05 10.30	229	228	24/05 22.30	226	218
12/05 4.30	219	210	18/05 16.30	228	228	25/05 4.30	223	219
12/05 10.30	222	217	18/05 22.30	230	218	25/05 10.30	229	231
12/05 16.30	229	209	19/05 4.30	224	222	25/05 16.30	231	224
12/05 22.30	223	210	19/05 10.30	223	234	25/05 22.30	230	217
13/05 4.30	221	213	19/05 16.30	230	221	26/05 4.30	224	221
13/05 10.30	221	222	19/05 22.30	233	217	26/05 10.30	226	234
13/05 16.30	226	216	20/05 4.30	223	221	26/05 16.30	227	223
13/05 22.30	223	212	20/05 10.30	227	223	26/05 22.30	230	217
14/05 4.30	219	217	20/05 16.30	231	217	27/05 4.30	222	222
14/05 10.30	221	230	20/05 22.30	225	216	27/05 10.30	227	234
14/05 16.30	227	219	21/05 4.30	224	217	27/05 16.30	233	226
14/05 22.30	225	214	21/05 10.30	225	217	27/05 22.30	227	222
15/05 4.30	223	217	21/05 16.30	225	215	28/05 4.30	224	221
15/05 10.30	224	230	21/05 22.30	224	215	28/05 10.30	227	236
15/05 16.30	230	218	22/05 4.30	221	218	28/05 16.30	232	226
15/05 22.30	224	217	22/05 10.30	224	219	28/05 22.30	229	222
16/05 4.30	221	216	22/05 16.30	225	219	29/05 4.30	222	224
16/05 10.30	221	226	22/05 22.30	227	213	29/05 10.30	228	236
16/05 16.30	231	216	23/05 4.30	222	217	29/05 16.30	235	227
16/05 22.30	223	217	23/05 10.30	224	227	29/05 22.30	229	222
17/05 4.30	224	216	23/05 16.30	229	220	30/05 4.30	223	227
17/05 10.30	223	224	23/05 22.30	233	213	30/05 10.30	223	238
17/05 16.30	227	221	24/05 4.30	218	219	30/05 16.30	238	230
17/05 22.30	225	222	24/05 10.30	223	228	30/05 22.30	226	224
18/05 4.30	226	223	24/05 16.30	233	223	31/05 4.30	222	224

**Tabella 6.3** - Andamento della concentrazione di radon in acqua dal 11/05 al 31/05

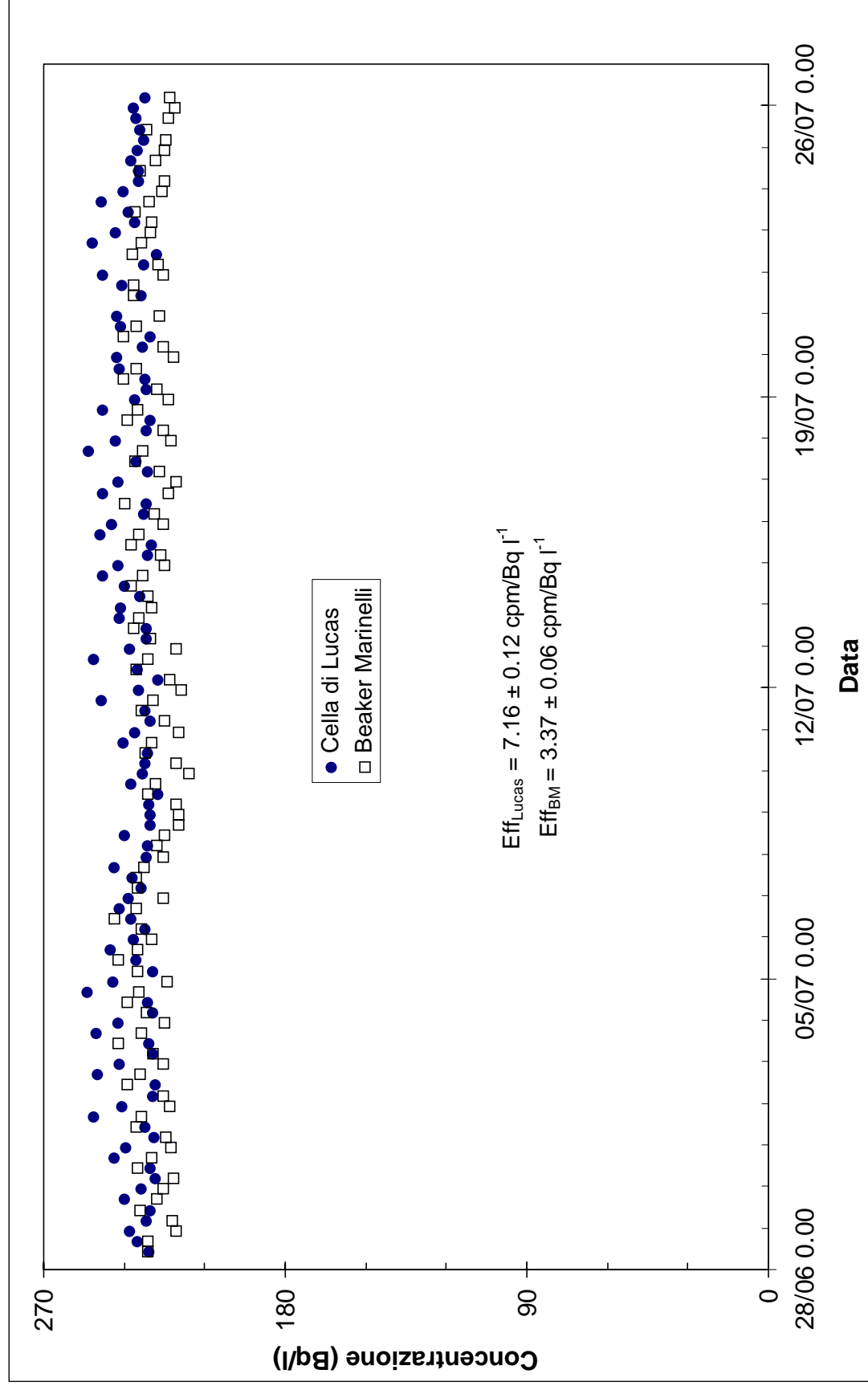




**Figura 6.9** - Andamento della concentrazione di radon in acqua dal 07/06 al 28/06

Data e ora	C <sub>Rn</sub> (Bq/l)		Data e ora	C <sub>Rn</sub> (Bq/l)		Data e ora	C <sub>Rn</sub> (Bq/l)	
	Lucas	BM		Lucas	BM		Lucas	BM
07/06 10.30	231	229	14/06 10.30	230	231	21/06 10.30	237	224
07/06 16.30	246	222	14/06 16.30	249	221	21/06 16.30	243	215
07/06 22.30	235	223	14/06 22.30	235	215	21/06 22.30	257	210
08/06 4.30	231	228	15/06 4.30	231	221	22/06 4.30	236	211
08/06 10.30	235	231	15/06 10.30	236	230	22/06 10.30	236	227
08/06 16.30	249	228	15/06 16.30	240	220	22/06 16.30	236	220
08/06 22.30	239	216	15/06 22.30	234	216	22/06 22.30	243	214
09/06 4.30	231	221	16/06 4.30	233	219	23/06 4.30	232	216
09/06 10.30	231	232	16/06 10.30	242	213	23/06 10.30	239	228
09/06 16.30	239	222	16/06 16.30	227	219	23/06 16.30	241	220
09/06 22.30	238	221	16/06 22.30	235	214	23/06 22.30	236	212
10/06 4.30	232	224	17/06 4.30	232	213	24/06 4.30	225	218
10/06 10.30	224	231	17/06 10.30	234	230	24/06 10.30	233	226
10/06 16.30	238	226	17/06 16.30	243	224	24/06 16.30	245	220
10/06 22.30	238	226	17/06 22.30	240	216	24/06 22.30	238	213
11/06 4.30	231	224	18/06 4.30	231	218	25/06 4.30	232	212
11/06 10.30	235	230	18/06 10.30	234	230	25/06 10.30	233	228
11/06 16.30	250	218	18/06 16.30	248	224	25/06 16.30	245	222
11/06 22.30	234	218	18/06 22.30	240	215	25/06 22.30	241	213
12/06 4.30	232	216	19/06 4.30	232	219	26/06 4.30	233	217
12/06 10.30	234	228	19/06 10.30	236	229	26/06 10.30	234	227
12/06 16.30	247	222	19/06 16.30	238	223	26/06 16.30	249	225
12/06 22.30	237	214	19/06 22.30	239	218	26/06 22.30	238	214
13/06 4.30	229	219	20/06 4.30	235	221	27/06 4.30	231	220
13/06 10.30	226	228	20/06 10.30	246	223	27/06 10.30	228	232
13/06 16.30	246	227	20/06 16.30	245	215	27/06 16.30	252	223
13/06 22.30	234	217	20/06 22.30	236	213	27/06 22.30	237	218
14/06 4.30	229	222	21/06 4.30	236	214	28/06 4.30	235	222

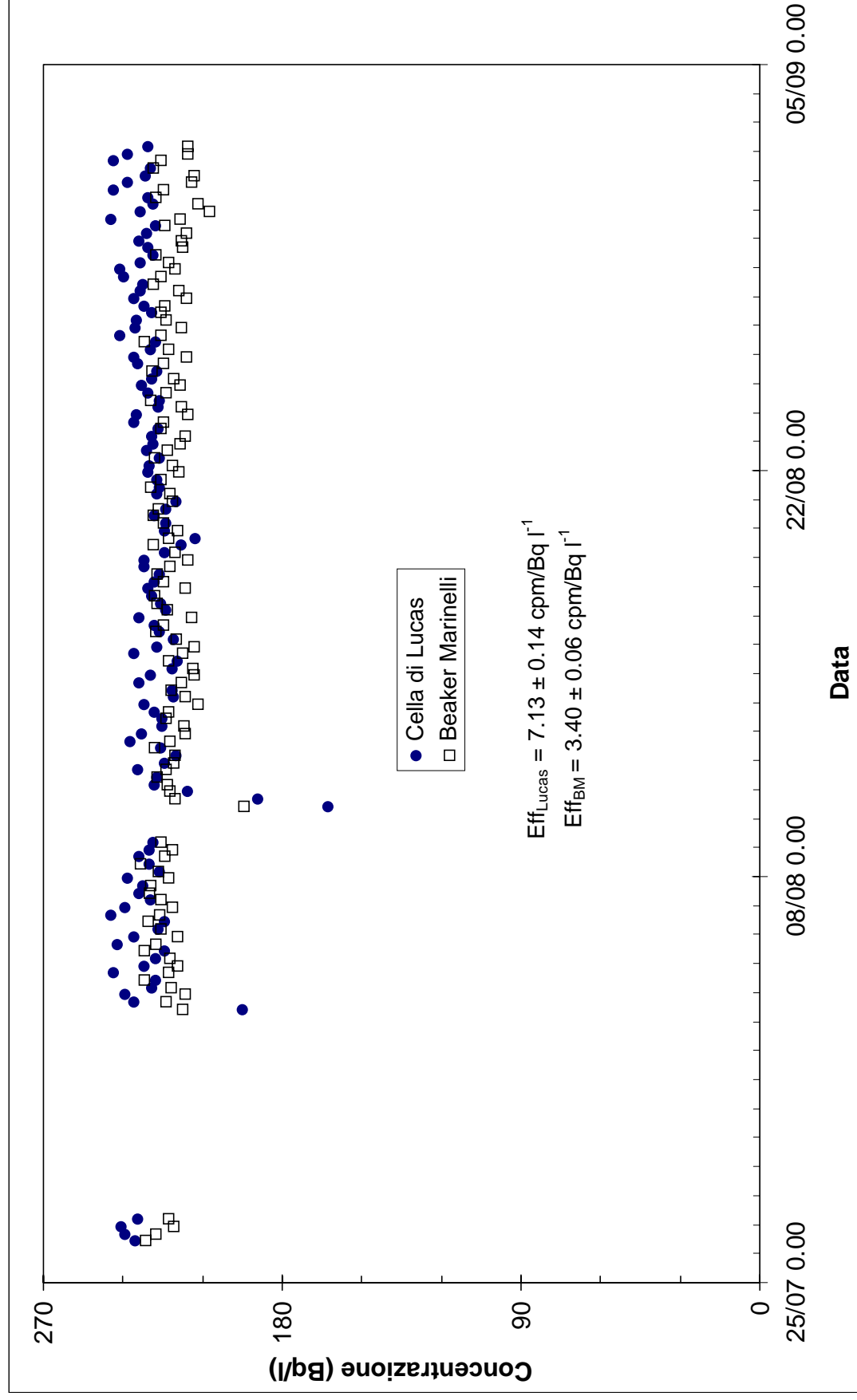
**Tabella 6.4** - Andamento della concentrazione di radon in acqua dal 07/06 al 28/06



**Figura 6.10** - Andamento della concentrazione di radon in acqua dal 28/06 al 26/07

Data e ora	C <sub>Rn</sub> (Bq/l)		Data e ora	C <sub>Rn</sub> (Bq/l)		Data e ora	C <sub>Rn</sub> (Bq/l)	
	Lucas	BM		Lucas	BM		Lucas	BM
28/06 10.30	231	231	07/07 16.30	244	233	16/07 22.30	242	221
28/06 16.30	235	231	07/07 22.30	232	225	17/07 4.30	231	227
28/06 22.30	238	221	08/07 4.30	231	228	17/07 10.30	235	236
29/06 4.30	231	222	08/07 10.30	240	225	17/07 16.30	253	233
29/06 10.30	230	234	08/07 16.30	230	220	17/07 22.30	243	223
29/06 16.30	240	228	08/07 22.30	230	220	18/07 4.30	232	225
29/06 22.30	234	226	09/07 4.30	231	221	18/07 10.30	230	239
30/06 4.30	228	222	09/07 10.30	227	231	18/07 16.30	248	235
30/06 10.30	230	235	09/07 16.30	237	228	18/07 22.30	236	223
30/06 16.30	243	230	09/07 22.30	233	216	19/07 4.30	232	228
30/06 22.30	239	223	10/07 4.30	232	221	19/07 10.30	232	240
01/07 4.30	229	224	10/07 10.30	231	232	19/07 16.30	242	236
01/07 10.30	232	235	10/07 16.30	240	230	19/07 22.30	243	222
01/07 16.30	251	234	10/07 22.30	236	220	20/07 4.30	233	225
01/07 22.30	241	223	11/07 4.30	230	225	20/07 10.30	230	240
02/07 4.30	229	226	11/07 10.30	232	234	20/07 16.30	241	235
02/07 10.30	228	239	11/07 16.30	248	229	20/07 22.30	243	227
02/07 16.30	250	234	11/07 22.30	235	219	21/07 10.30	234	236
02/07 22.30	242	225	12/07 4.30	227	223	21/07 16.30	241	237
03/07 4.30	229	229	12/07 10.30	235	236	21/07 22.30	248	225
03/07 10.30	231	242	12/07 16.30	251	231	22/07 4.30	233	227
03/07 16.30	250	234	12/07 22.30	238	221	22/07 10.30	228	237
03/07 22.30	242	225	13/07 4.30	232	230	22/07 16.30	252	234
04/07 4.30	229	232	13/07 10.30	232	236	22/07 22.30	243	230
04/07 10.30	231	239	13/07 16.30	242	235	23/07 4.30	236	230
04/07 16.30	254	235	13/07 22.30	241	230	23/07 10.30	238	236
04/07 22.30	244	224	14/07 4.30	234	231	23/07 16.30	248	231
05/07 4.30	229	235	14/07 10.30	240	237	23/07 22.30	240	226
05/07 10.30	236	242	14/07 16.30	248	233	24/07 4.30	235	225
05/07 16.30	245	235	14/07 22.30	242	225	24/07 10.30	235	234
05/07 22.30	236	230	15/07 4.30	231	226	24/07 16.30	237	229
06/07 4.30	232	234	15/07 10.30	230	237	24/07 22.30	235	225
06/07 10.30	238	243	15/07 16.30	249	234	25/07 4.30	233	224
06/07 16.30	242	235	15/07 22.30	245	225	25/07 10.30	234	232
06/07 22.30	238	225	16/07 4.30	233	229	25/07 16.30	235	223
07/07 4.30	234	235	16/07 10.30	232	240	25/07 22.30	236	221
07/07 10.30	237	236	16/07 16.30	248	223	26/07 4.30	232	223

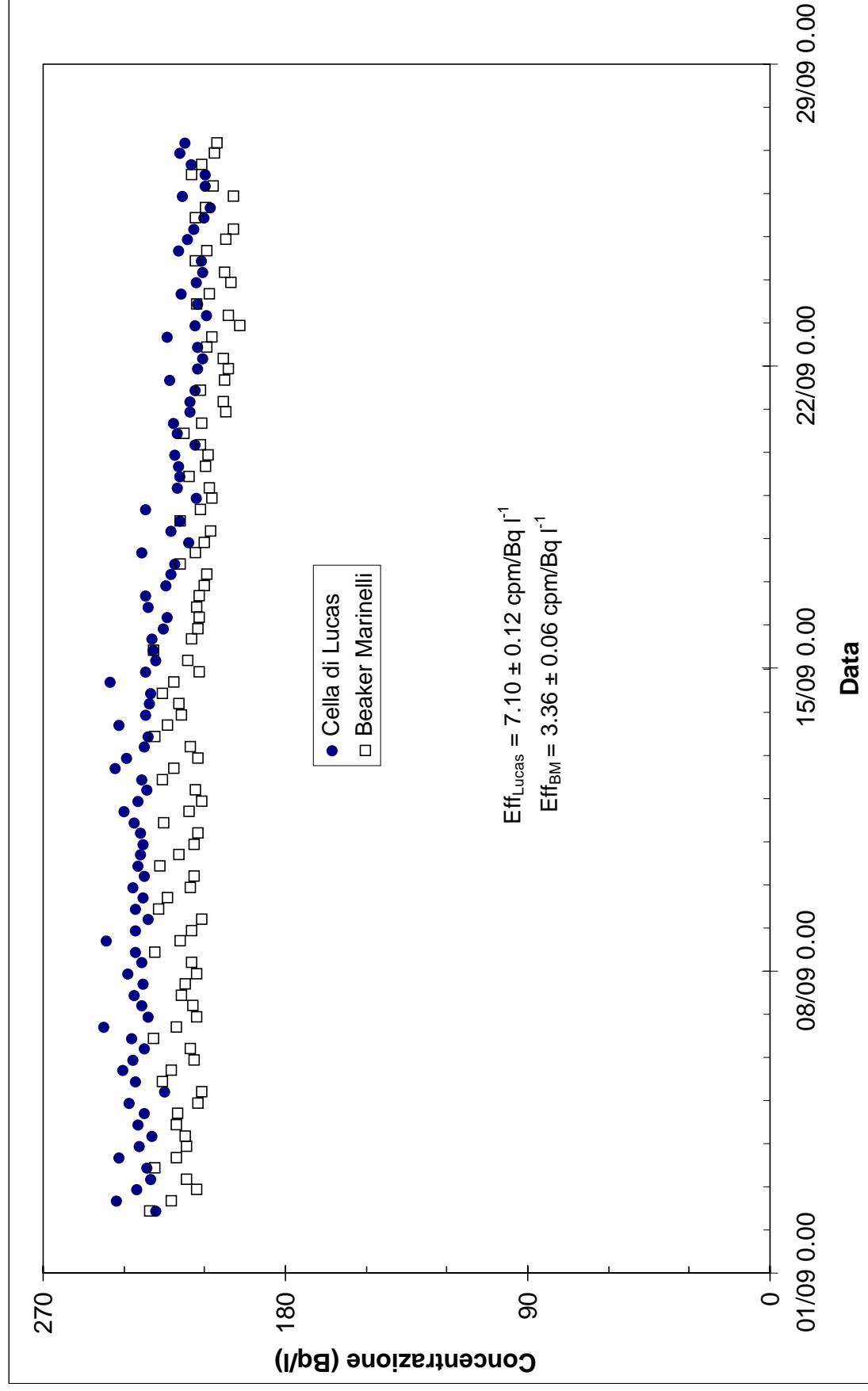
**Tabella 6.5** - Andamento della concentrazione di radon in acqua dal 28/06 al 26/07



**Figura 6.11** - Andamento della concentrazione di radon in acqua dal 26/07 al 02/09

Data e ora	C <sub>Rn</sub> (Bq/l)		Data e ora	C <sub>Rn</sub> (Bq/l)		Data e ora	C <sub>Rn</sub> (Bq/l)	
	Lucas	BM		Lucas	BM		Lucas	BM
26/07 10.30	235	232	13/08 10.30	225	224	23/08 10.30	227	226
26/07 16.30	239	228	13/08 16.30	228	223	23/08 16.30	236	225
26/07 22.30	240	221	13/08 22.30	232	212	23/08 22.30	235	215
27/07 4.30	234	223	14/08 4.30	221	217	24/08 4.30	227	218
03/08 10.30	195	217	14/08 10.30	221	222	24/08 10.30	226	230
03/08 16.30	236	224	14/08 16.30	234	218	24/08 16.30	231	224
03/08 22.30	239	217	14/08 22.30	230	213	24/08 22.30	233	219
04/08 4.30	229	222	15/08 4.30	221	214	25/08 4.30	229	221
04/08 10.30	227	232	15/08 10.30	220	223	25/08 10.30	227	229
04/08 16.30	244	223	15/08 16.30	236	217	25/08 16.30	234	225
04/08 22.30	232	219	15/08 22.30	227	213	25/08 22.30	236	216
05/08 4.30	227	222	16/08 4.30	221	220	26/08 4.30	230	223
05/08 10.30	224	232	16/08 10.30	226	228	26/08 10.30	228	232
05/08 16.30	242	228	16/08 16.30	228	225	26/08 16.30	241	226
05/08 22.30	236	220	16/08 22.30	234	214	26/08 22.30	235	218
06/08 4.30	227	226	17/08 4.30	224	223	27/08 4.30	235	224
06/08 10.30	224	230	17/08 10.30	226	227	27/08 10.30	229	226
06/08 16.30	245	226	17/08 16.30	229	228	27/08 16.30	232	224
06/08 22.30	239	221	17/08 22.30	231	217	27/08 22.30	236	216
07/08 4.30	230	226	18/08 4.30	228	225	28/08 4.30	233	219
07/08 10.30	234	230	18/08 10.30	226	227	28/08 10.30	232	228
07/08 16.30	233	229	18/08 16.30	232	222	28/08 16.30	240	226
07/08 22.30	238	223	18/08 22.30	232	215	28/08 22.30	241	221
08/08 4.30	226	227	19/08 4.30	224	220	29/08 4.30	234	223
08/08 10.30	230	234	19/08 10.30	218	229	29/08 10.30	229	228
08/08 16.30	234	224	19/08 16.30	213	223	29/08 16.30	230	218
08/08 22.30	230	221	19/08 22.30	224	219	29/08 22.30	234	218
09/08 4.30	229	226	20/08 4.30	224	225	30/08 4.30	231	216
10/08 10.30	163	195	20/08 10.30	228	229	30/08 10.30	227	224
10/08 16.30	189	220	20/08 16.30	224	227	30/08 16.30	245	218
10/08 22.30	216	222	20/08 22.30	220	221	30/08 22.30	234	207
11/08 4.30	228	223	21/08 4.30	227	222	31/08 4.30	229	212
11/08 10.30	227	227	21/08 10.30	226	230	31/08 10.30	230	228
11/08 16.30	235	224	21/08 16.30	227	226	31/08 16.30	243	225
11/08 22.30	224	221	21/08 22.30	230	219	31/08 22.30	238	214
12/08 4.30	220	220	22/08 4.30	230	221	01/09 4.30	231	213
12/08 10.30	226	228	22/08 10.30	226	228	01/09 10.30	230	229
12/08 16.30	237	222	22/08 16.30	231	223	01/09 16.30	243	226
12/08 22.30	233	217	22/08 22.30	229	218	01/09 22.30	238	216
13/08 4.30	225	217	23/08 4.30	229	216	02/09 4.30	231	216

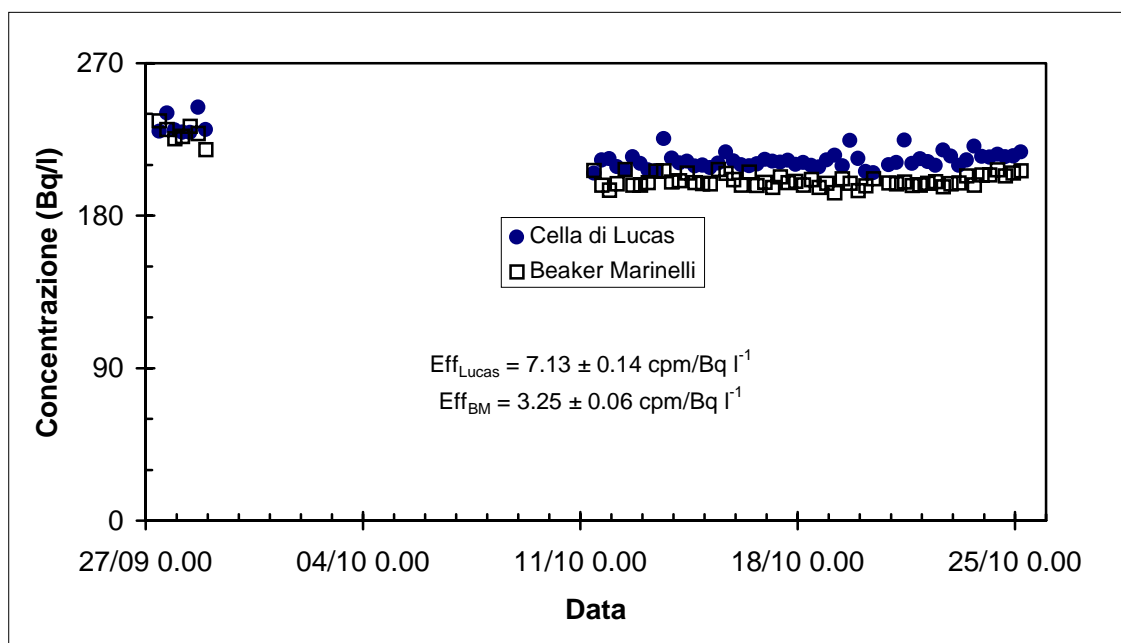
**Tabella 6.6** - Andamento della concentrazione di radon in acqua dal 26/07 al 02/09



**Figura 6.12** - Andamento della concentrazione di radon in acqua dal 02/09 al 27/09

Data e ora	C <sub>Rn</sub> (Bq/l)		Data e ora	C <sub>Rn</sub> (Bq/l)		Data e ora	C <sub>Rn</sub> (Bq/l)	
	Lucas	BM		Lucas	BM		Lucas	BM
02/09 10.30	228	230	10/09 22.30	233	214	19/09 10.30	219	216
02/09 16.30	242	222	11/09 4.30	234	212	19/09 16.30	219	210
02/09 22.30	235	213	11/09 10.30	236	225	19/09 22.30	221	209
03/09 4.30	230	217	11/09 16.30	240	216	20/09 4.30	214	212
03/09 10.30	231	229	11/09 22.30	235	211	20/09 10.30	220	218
03/09 16.30	242	220	12/09 4.30	231	213	20/09 16.30	222	211
03/09 22.30	234	217	12/09 10.30	233	226	20/09 22.30	216	202
04/09 4.30	229	217	12/09 16.30	243	221	21/09 4.30	215	203
04/09 10.30	234	221	12/09 22.30	239	212	21/09 10.30	214	212
04/09 16.30	232	220	13/09 4.30	232	215	21/09 16.30	223	203
04/09 22.30	238	212	13/09 10.30	231	229	21/09 22.30	213	201
05/09 4.30	225	211	13/09 16.30	242	224	22/09 4.30	210	203
05/09 10.30	236	226	13/09 22.30	232	218	22/09 10.30	212	209
05/09 16.30	240	223	14/09 4.30	230	220	22/09 16.30	224	207
05/09 22.30	236	214	14/09 10.30	230	226	22/09 22.30	213	197
06/09 4.30	232	215	14/09 16.30	245	221	23/09 4.30	209	201
06/09 10.30	237	229	14/09 22.30	232	212	23/09 10.30	213	213
06/09 16.30	247	221	15/09 4.30	228	216	23/09 16.30	219	208
06/09 22.30	231	213	15/09 10.30	229	229	23/09 22.30	213	200
07/09 4.30	233	215	15/09 16.30	230	215	24/09 4.30	210	203
07/09 10.30	236	219	15/09 22.30	225	213	24/09 10.30	211	213
07/09 16.30	233	217	16/09 4.30	224	212	24/09 16.30	220	209
07/09 22.30	238	213	16/09 10.30	231	213	24/09 22.30	216	202
08/09 4.30	233	215	16/09 16.30	232	212	25/09 4.30	214	200
08/09 10.30	235	228	16/09 22.30	224	210	25/09 10.30	210	213
08/09 16.30	247	219	17/09 4.30	222	209	25/09 16.30	208	210
08/09 22.30	235	215	17/09 10.30	221	219	25/09 22.30	218	199
09/09 4.30	231	211	17/09 16.30	233	213	26/09 4.30	210	207
09/09 10.30	236	227	17/09 22.30	216	210	26/09 10.30	210	215
09/09 16.30	233	224	18/09 4.30	223	208	26/09 16.30	215	211
09/09 22.30	237	215	18/09 10.30	219	219	26/09 22.30	219	206
10/09 4.30	232	214	18/09 16.30	232	211	27/09 4.30	217	206
10/09 10.30	235	227	18/09 22.30	213	207	-	-	-
10/09 16.30	234	220	19/09 4.30	220	208	-	-	-

**Tabella 6.7** - Andamento della concentrazione di radon in acqua dal 02/09 al 27/09

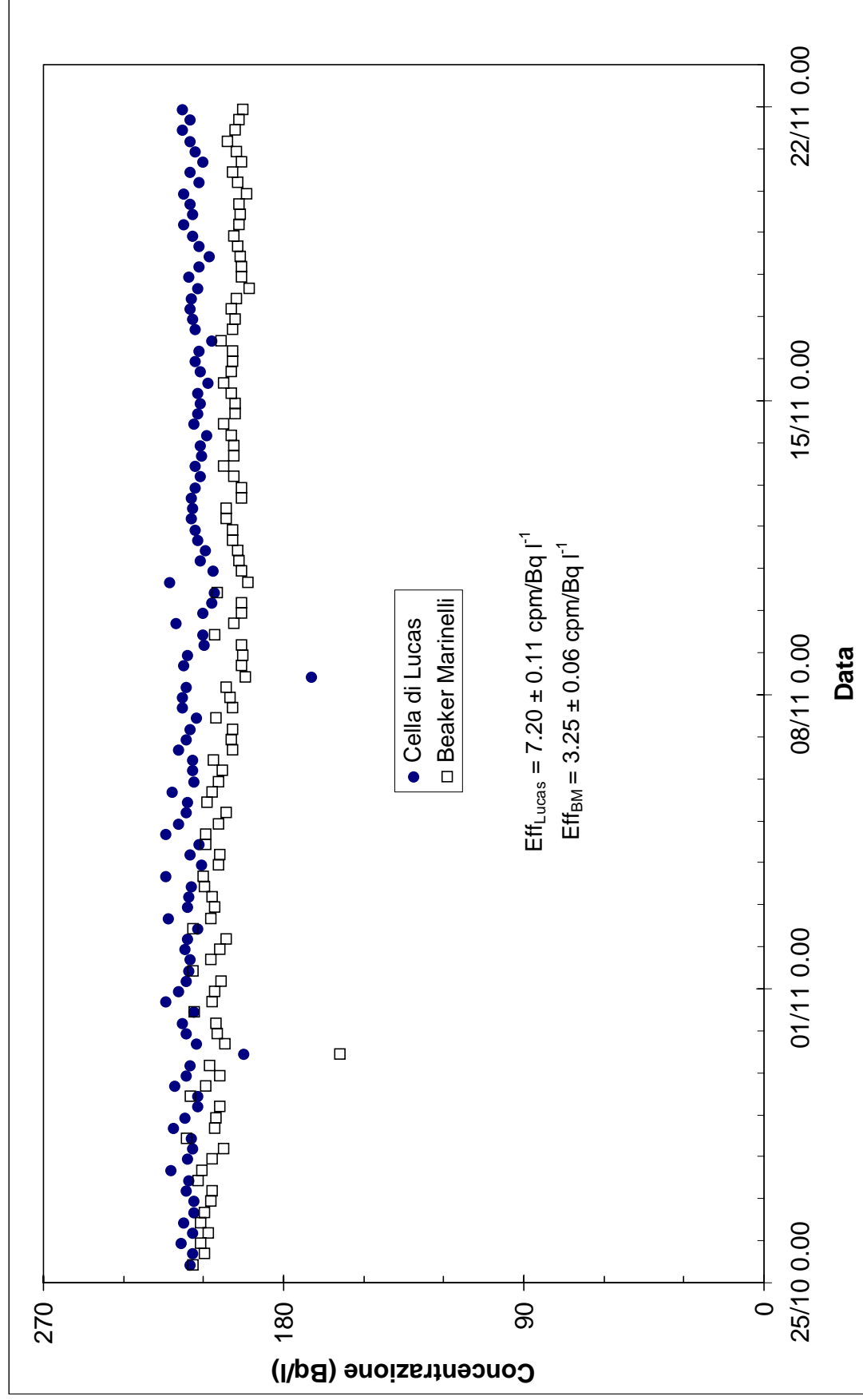


**Figura 6.13** - Andamento della concentrazione di radon in acqua dal 27/09 al 25/10

Data e ora	C <sub>Rn</sub> (Bq/l)		Data e ora	C <sub>Rn</sub> (Bq/l)		Data e ora	C <sub>Rn</sub> (Bq/l)	
	Lucas	BM		Lucas	BM		Lucas	BM
27/09 10.30	230	236	14/10 22.30	210	199	20/10 4.30	206	198
27/09 16.30	241	231	15/10 4.30	208	199	20/10 10.30	205	202
27/09 22.30	230	225	15/10 10.30	211	207	20/10 22.30	210	199
28/09 4.30	229	227	15/10 16.30	217	205	21/10 4.30	211	199
28/09 10.30	229	233	15/10 22.30	212	201	21/10 10.30	224	200
28/09 16.30	244	229	16/10 4.30	210	198	21/10 16.30	211	198
28/09 22.30	231	219	16/10 10.30	209	206	21/10 22.30	213	198
11/10 10.30	205	207	16/10 16.30	211	198	22/10 4.30	212	199
11/10 16.30	213	198	16/10 22.30	213	200	22/10 10.30	210	200
11/10 22.30	213	195	17/10 4.30	212	197	22/10 16.30	219	197
12/10 4.30	209	199	17/10 10.30	212	203	22/10 22.30	215	199
12/10 10.30	207	207	17/10 16.30	213	200	23/10 4.30	209	199
12/10 16.30	215	198	17/10 22.30	210	200	23/10 10.30	213	203
12/10 22.30	211	198	18/10 4.30	211	198	23/10 16.30	221	198
13/10 4.30	207	200	18/10 10.30	210	201	23/10 22.30	215	204
13/10 10.30	206	206	18/10 16.30	209	197	24/10 4.30	214	204
13/10 16.30	225	207	18/10 22.30	213	199	24/10 10.30	216	207
13/10 22.30	214	200	19/10 4.30	216	194	24/10 16.30	215	203
14/10 4.30	211	201	19/10 10.30	209	202	24/10 22.30	215	205
14/10 10.30	212	205	19/10 16.30	224	199	25/10 4.30	217	206
14/10 16.30	209	199	19/10 22.30	214	195	-	-	-

**Tabella 6.8** - Andamento della concentrazione di radon in acqua dal 27/09 al 25/10

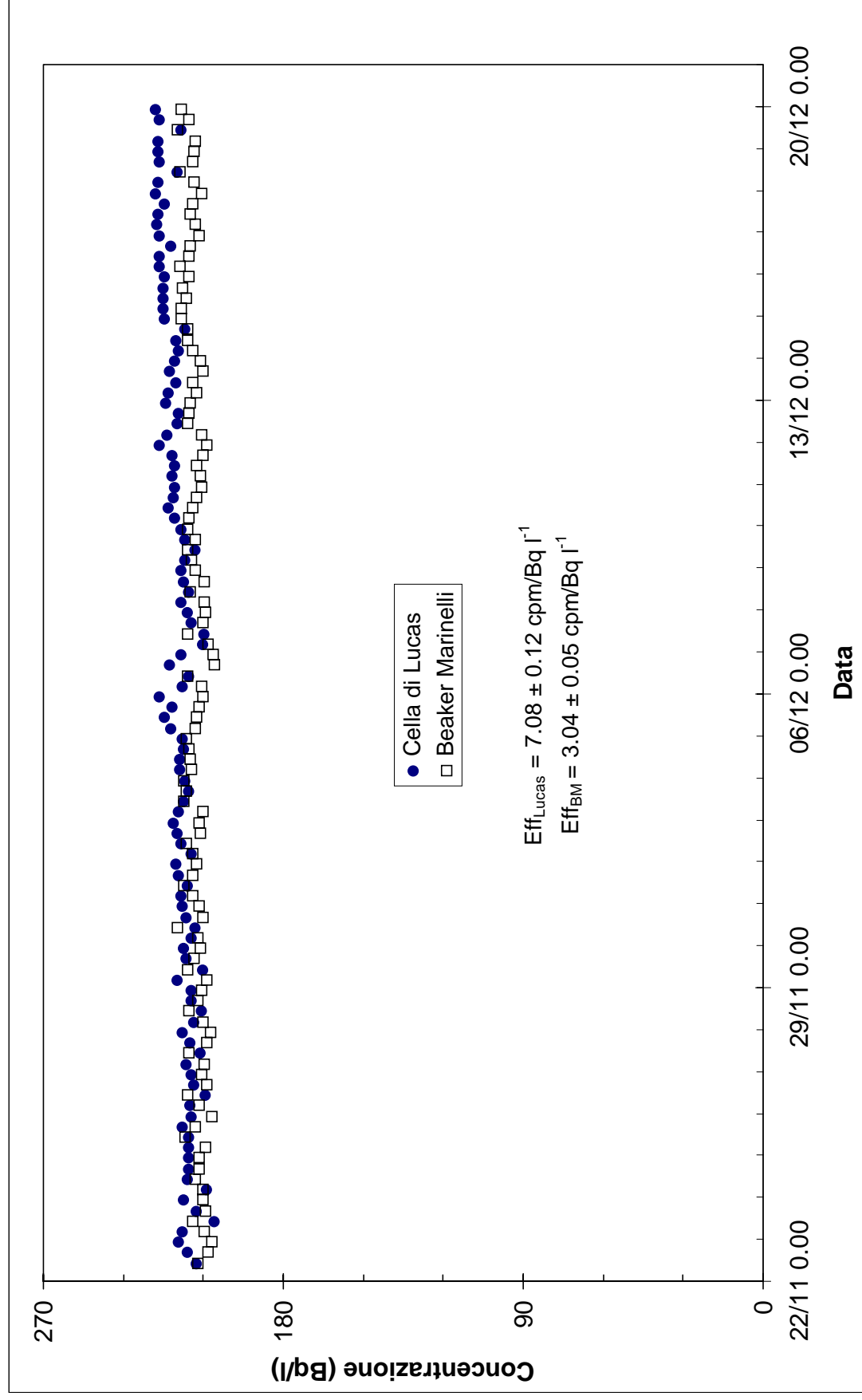




**Figura 6.14** - Andamento della concentrazione di radon in acqua dal 25/10 al 22/11

Data e ora	C <sub>Rn</sub> (Bq/l)		Data e ora	C <sub>Rn</sub> (Bq/l)		Data e ora	C <sub>Rn</sub> (Bq/l)	
	Lucas	BM		Lucas	BM		Lucas	BM
25/10 10.30	215	214	03/11 22.30	211	204	13/11 10.30	213	202
25/10 16.30	214	210	04/11 4.30	215	204	13/11 16.30	211	199
25/10 22.30	218	211	04/11 10.30	212	209	13/11 22.30	211	199
26/10 4.30	214	208	04/11 16.30	224	209	14/11 4.30	209	200
26/10 10.30	217	211	04/11 22.30	219	204	14/11 10.30	214	202
26/10 16.30	213	210	05/11 4.30	217	201	14/11 16.30	212	198
26/10 22.30	214	207	05/11 10.30	216	209	14/11 22.30	211	198
27/10 4.30	216	207	05/11 16.30	222	207	15/11 4.30	212	200
27/10 10.30	216	212	05/11 22.30	213	205	15/11 10.30	208	203
27/10 16.30	222	211	06/11 4.30	214	203	15/11 16.30	211	200
27/10 22.30	216	207	06/11 10.30	214	206	15/11 22.30	213	199
28/10 4.30	214	203	06/11 16.30	219	199	16/11 4.30	211	199
28/10 10.30	214	217	06/11 22.30	217	200	16/11 10.30	207	203
28/10 16.30	221	206	07/11 4.30	215	199	16/11 16.30	213	199
28/10 22.30	217	205	07/11 10.30	213	205	16/11 22.30	214	198
29/10 4.30	212	204	07/11 16.30	218	199	17/11 4.30	215	200
29/10 10.30	212	215	07/11 22.30	218	200	17/11 10.30	214	198
29/10 16.30	221	209	08/11 4.30	216	201	17/11 16.30	212	193
29/10 22.30	216	204	08/11 10.30	169	194	17/11 22.30	215	196
30/10 4.30	215	208	08/11 16.30	217	196	18/11 4.30	211	196
30/10 10.30	195	159	08/11 22.30	216	195	18/11 10.30	208	196
30/10 16.30	212	202	09/11 4.30	209	196	18/11 16.30	211	197
30/10 22.30	217	205	09/11 10.30	210	206	18/11 22.30	214	199
31/10 4.30	218	206	09/11 16.30	220	199	19/11 4.30	217	197
31/10 10.30	213	214	09/11 22.30	210	196	19/11 10.30	214	196
31/10 16.30	224	207	10/11 4.30	207	196	19/11 16.30	215	197
31/10 22.30	219	206	10/11 10.30	206	205	19/11 22.30	217	194
01/11 4.30	216	204	10/11 16.30	223	193	20/11 4.30	212	197
01/11 10.30	215	214	10/11 22.30	206	196	20/11 10.30	215	199
01/11 16.30	215	207	11/11 4.30	211	197	20/11 16.30	210	196
01/11 22.30	217	204	11/11 10.30	209	197	20/11 22.30	213	198
02/11 4.30	216	202	11/11 16.30	212	199	21/11 4.30	215	201
02/11 10.30	212	214	11/11 22.30	213	199	21/11 10.30	218	198
02/11 16.30	223	207	12/11 4.30	214	202	21/11 16.30	215	197
02/11 22.30	216	206	12/11 10.30	214	201	21/11 22.30	218	196
03/11 4.30	216	207	12/11 16.30	215	196	22/11 4.30	217	193
03/11 10.30	215	210	12/11 22.30	213	196	-	-	-
03/11 16.30	224	210	13/11 4.30	211	199	-	-	-

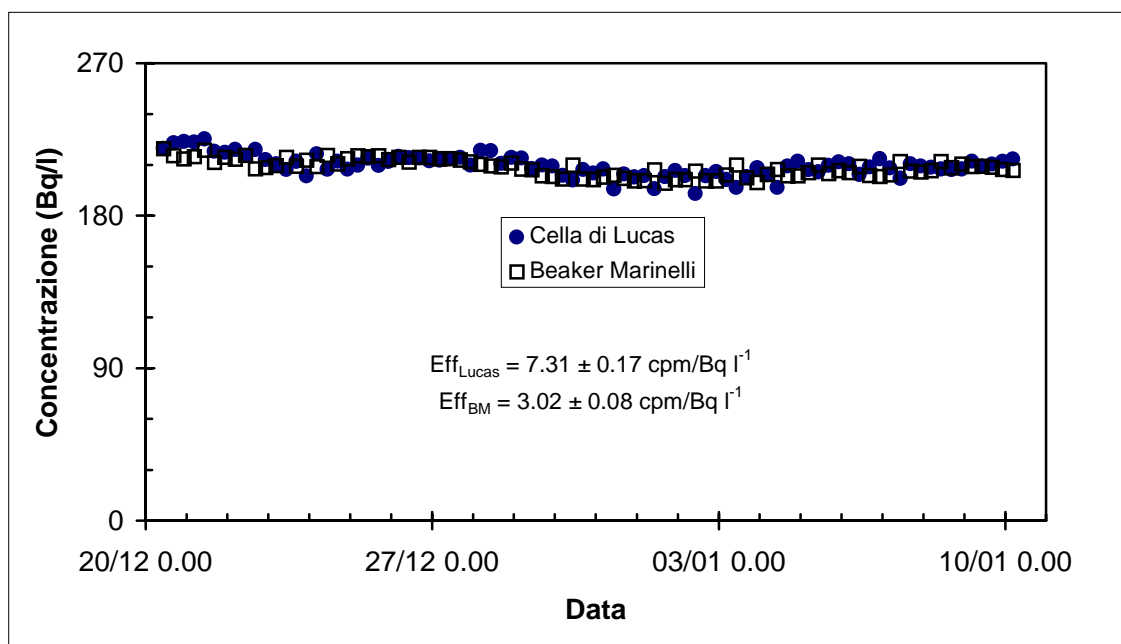
**Tabella 6.9** - Andamento della concentrazione di radon in acqua dal 25/10 al 22/11



**Figura 6.15** - Andamento della concentrazione di radon in acqua dal 22/11 al 20/12

Data e ora	C <sub>Rn</sub> (Bq/l)		Data e ora	C <sub>Rn</sub> (Bq/l)		Data e ora	C <sub>Rn</sub> (Bq/l)	
	Lucas	BM		Lucas	BM		Lucas	BM
22/11 10.30	213	212	01/12 22.30	220	212	11/12 10.30	221	213
22/11 16.30	216	208	02/12 4.30	214	214	11/12 16.30	222	210
22/11 22.30	219	207	02/12 10.30	218	216	11/12 22.30	226	209
23/11 4.30	218	210	02/12 16.30	220	211	12/12 4.30	224	211
23/11 10.30	206	214	02/12 22.30	221	212	12/12 10.30	220	216
23/11 16.30	213	209	03/12 4.30	219	210	12/12 16.30	219	216
23/11 22.30	217	210	03/12 10.30	217	217	12/12 22.30	224	215
24/11 4.30	209	210	03/12 16.30	216	216	13/12 4.30	223	213
24/11 10.30	216	213	03/12 22.30	217	217	13/12 10.30	220	214
24/11 16.30	215	212	04/12 4.30	219	215	13/12 16.30	223	210
24/11 22.30	215	212	04/12 10.30	219	215	13/12 22.30	221	211
25/11 4.30	215	209	04/12 16.30	217	216	14/12 4.30	219	214
25/11 10.30	215	217	04/12 22.30	218	216	14/12 10.30	220	216
25/11 16.30	218	213	05/12 4.30	222	213	14/12 16.30	217	216
25/11 22.30	214	207	05/12 10.30	225	213	14/12 22.30	224	218
26/11 4.30	215	211	05/12 16.30	222	212	15/12 4.30	225	218
26/11 10.30	209	216	05/12 22.30	226	210	15/12 10.30	225	216
26/11 16.30	213	209	06/12 4.30	218	211	15/12 16.30	225	218
26/11 22.30	215	210	06/12 10.30	215	216	15/12 22.30	224	215
27/11 4.30	216	210	06/12 16.30	222	206	16/12 4.30	227	219
27/11 10.30	211	216	06/12 22.30	218	206	16/12 10.30	226	216
27/11 16.30	215	209	07/12 4.30	210	208	16/12 16.30	222	215
27/11 22.30	218	207	07/12 10.30	210	216	16/12 22.30	227	212
28/11 4.30	213	210	07/12 16.30	214	210	17/12 4.30	227	213
28/11 10.30	211	215	07/12 22.30	216	209	17/12 10.30	227	215
28/11 16.30	215	212	08/12 4.30	218	210	17/12 16.30	225	214
28/11 22.30	215	211	08/12 10.30	215	215	17/12 22.30	228	211
29/11 4.30	220	209	08/12 16.30	218	210	18/12 4.30	227	214
29/11 10.30	210	216	08/12 22.30	218	213	18/12 10.30	220	219
29/11 16.30	216	214	09/12 4.30	217	215	18/12 16.30	226	214
29/11 22.30	217	211	09/12 10.30	213	216	18/12 22.30	227	213
30/11 4.30	214	212	09/12 16.30	217	213	19/12 4.30	227	213
30/11 10.30	213	220	09/12 22.30	218	216	19/12 10.30	218	220
30/11 16.30	216	210	10/12 4.30	221	215	19/12 16.30	227	215
30/11 22.30	218	211	10/12 10.30	223	214	19/12 22.30	228	218
01/12 4.30	218	214	10/12 16.30	221	212	20/12 4.30	226	216
01/12 10.30	216	217	10/12 22.30	221	211	-	-	-
01/12 16.30	219	214	11/12 4.30	221	211	-	-	-

**Tabella 6.10** - Andamento della concentrazione di radon in acqua dal 22/11 al 20/12



**Figura 6.16** - Andamento della concentrazione di radon in acqua dal 20/12/1999 al 10/01/2000

Data e ora	C <sub>Rn</sub> (Bq/l)		Data e ora	C <sub>Rn</sub> (Bq/l)		Data e ora	C <sub>Rn</sub> (Bq/l)	
	Lucas	BM		Lucas	BM		Lucas	BM
07/06 10.30	220	219	14/06 10.30	214	214	21/06 10.30	196	210
07/06 16.30	223	215	14/06 16.30	214	213	21/06 16.30	203	202
07/06 22.30	224	213	14/06 22.30	210	212	21/06 22.30	208	200
08/06 4.30	223	215	15/06 4.30	219	210	22/06 4.30	204	204
08/06 10.30	225	219	15/06 10.30	218	209	22/06 10.30	197	207
08/06 16.30	218	212	15/06 16.30	211	209	22/06 16.30	209	204
08/06 22.30	217	215	15/06 22.30	214	211	22/06 22.30	212	204
09/06 4.30	219	213	16/06 4.30	214	208	23/06 4.30	207	205
09/06 10.30	215	216	16/06 10.30	208	207	23/06 10.30	206	210
09/06 16.30	219	208	16/06 16.30	210	204	23/06 16.30	209	205
09/06 22.30	213	208	16/06 22.30	209	203	23/06 22.30	212	207
10/06 4.30	211	210	17/06 4.30	204	202	24/06 4.30	210	205
10/06 10.30	207	215	17/06 10.30	201	210	24/06 10.30	204	209
10/06 16.30	212	209	17/06 16.30	207	202	24/06 16.30	209	204
10/06 22.30	203	213	17/06 22.30	205	201	24/06 22.30	214	203
11/06 4.30	216	209	18/06 4.30	208	203	25/06 4.30	208	204
11/06 10.30	207	216	18/06 10.30	196	204	25/06 10.30	202	212
11/06 16.30	212	211	18/06 16.30	205	202	25/06 16.30	210	206
11/06 22.30	207	214	18/06 22.30	203	201	25/06 22.30	209	206
12/06 4.30	210	215	19/06 4.30	203	201	26/06 4.30	209	207
12/06 10.30	214	215	19/06 10.30	196	207	26/06 10.30	208	212
12/06 16.30	210	215	19/06 16.30	203	199	26/06 16.30	207	208
12/06 22.30	212	213	19/06 22.30	207	201	26/06 22.30	207	211
13/06 4.30	215	215	20/06 4.30	204	201	27/06 4.30	212	209
13/06 10.30	214	212	20/06 10.30	193	206	27/06 10.30	209	209
13/06 16.30	214	215	20/06 16.30	204	201	27/06 16.30	210	209
13/06 22.30	212	214	20/06 22.30	206	201	27/06 22.30	212	207
14/06 4.30	213	214	21/06 4.30	201	204	28/06 4.30	213	207

**Tabella 6.11** - Andamento della concentrazione di radon in acqua dal 20/12/1999 al 10/01/2000

Si è ipotizzato che in una tipica stazione di monitoraggio si potranno effettuare prove di calibrazione con frequenza al massimo mensile ; pertanto sono stati impiegati valori di efficienza di conteggio ottenuti come media pesata dei dati di calibrazione disponibili mese per mese secondo la relazione [12] :

$$\text{Eff}_{\text{best}} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \text{Eff}_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

$$\sigma_{\text{Eff}_{\text{best}}} = \left( \sum_{i=1}^n w_i \right)^{-1/2}$$

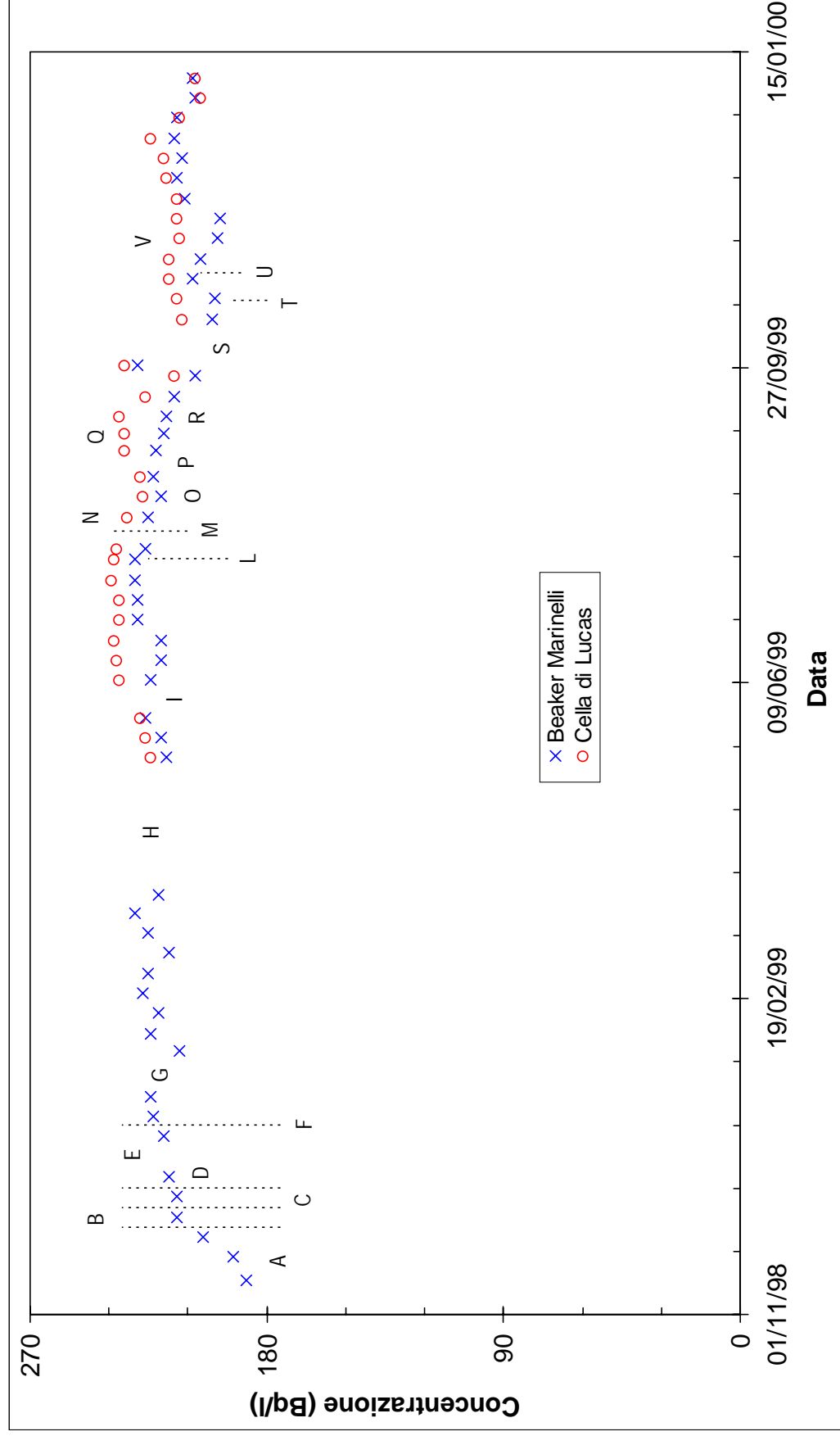
avendo pesato le efficienze  $\text{Eff}_i$  con un termine dato dall'inverso del quadrato dello stimatore della loro deviazione standard :

$$w_i = \frac{1}{\sigma_{\text{Eff}_i}^2}$$

Da quanto affermato nei paragrafi precedenti questa procedura, senz'altro valida nel caso del sistema  $\alpha$ , può causare imprecisioni nel caso del sistema  $\gamma$  ove si verifichino forti variazioni di temperatura nell'arco temporale considerato.

Per i valori di efficienza così ottenuti si rimanda ai grafici in cui sono utilizzati.

Un quadro globale dell'andamento della concentrazione di radon in acqua durante tutto l'arco della sperimentazione si ha osservando la figura 6.17 in cui ogni indicatore è rappresentativo della concentrazione media settimanale (ottenuto impiegando efficienze medie mensili).



**Figura 6.17** - Andamento della concentrazione di radon nell'acqua durante il periodo di sperimentazione

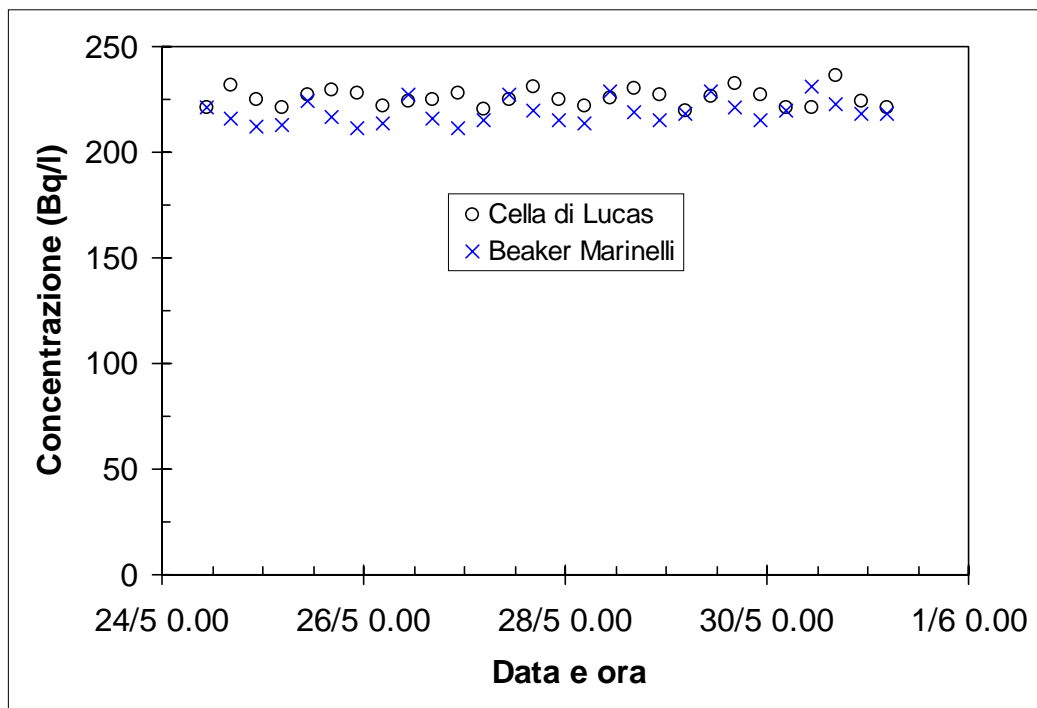
<b>A</b>	Tempo di ricircolo = 20'
<b>B</b>	Tempo di ricircolo = 30'
<b>C</b>	Tempo di ricircolo = 40'. Verso la fine ciclo sono iniziati malfunzionamenti della scheda multicanale (mancanza di dati)
<b>D</b>	Tempo di ricircolo = 30'. Parziale mancanza dei dati a causa di malfunzionamenti intermittenti della scheda multicanale
<b>E</b>	Dato settimanale mancante per pressoché totale inattività della scheda multicanale
<b>F</b>	Sostituzione della scheda multicanale
<b>G</b>	Rottura del timer che comanda il sistema di acquisizione e la pompa che preleva l'acqua dal pozzo
<b>H</b>	Periodo di sospensione per installazione e collaudo del sistema $\alpha$ in parallelo al $\gamma$ . Al riavvio si è dovuto smontare l'elettrovalvola di alimentazione principale per rimuovere incrostazioni
<b>I</b>	Dato settimanale mancante per errore dell'operatore
<b>L</b>	Mancanza di energia elettrica. Nessun dato perso
<b>M</b>	Prolungata mancanza di energia elettrica nel locale
<b>N</b>	Anomalia della risposta iniziale del sistema $\alpha$
<b>O</b>	Mancanza dell'energia elettrica per 24 <sup>h</sup> . Ancora una anomalia della risposta iniziale del sistema $\alpha$
<b>P</b>	Guadagno di 10' dopo 20 giorni del clock del PC. Perdita progressiva di conteggi $\gamma$ a partire dal 25/8
<b>Q</b>	Perdita conteggi $\gamma$ per eccessivo guadagno del clock del PC
<b>R</b>	Perdita conteggi $\gamma$ per eccessivo guadagno del clock del PC
<b>S</b>	Perdita di dati per blocco prolungato del clock della scheda multicanale
<b>T</b>	Perdita dati relativi ad un ciclo del 20/10/1999 per mancanza di energia elettrica
<b>U</b>	Mancanza di energia elettrica il 30/10/1999. Nessun dato perso ma riscontrata anomalia della risposta al riavvio
<b>V</b>	Anomalia della risposta iniziale del sistema $\alpha$ . Dato di calibrazione non valido

**Legenda** di figura 6.17

È evidente che il sistema  $\alpha$  sovrastima sistematicamente la concentrazione di radon rispetto al sistema  $\gamma$ . Spesso sono stati registrati andamenti del tipo di quello mostrato in figura 6.18, sostanzialmente in opposizione di fase. I valori di concentrazione dell'acqua campionata alle ore 10:30 sono in buon accordo ; successivamente il sistema  $\alpha$  mostra una concentrazione dapprima crescente e poi decrescente, per il sistema  $\gamma$  vale l'esatto contrario. Una possibile spiegazione si basa sull'osservazione che i valori massimi con il sistema  $\alpha$  sono raggiunti nelle ore più calde della giornata in cui la solubilità del radon in acqua è relativamente bassa : durante la fase di ricambio di acqua nel beaker una quota parte del radon è trasferita nel volume di espansione sovrastante ed andrà ad arricchire ulteriormente l'aria di degassamento. Per quanto riguarda il sistema  $\gamma$  potrebbero invece interferire fenomeni quali la sopra citata curva di solubilità congiuntamente allo scarso



utilizzo dell'acqua del pozzo negli orari pomeridiani e notturni ed infine la marcata dipendenza dell'efficienza di conteggio dalla temperatura ambiente.



**Figura 6.18** - andamento della concentrazione di radon in acqua dal 24/5/1999 al 31/5/1999

Nell'arco della sperimentazione si sono manifestati problemi di diversa natura che hanno comportato una perdita parziale o totale di dati ; sono elencati nella legenda della figura 6.17.

Gran parte dei problemi sono scaturiti dalle schede multicanale impiegate e dal PC in cui sono state installate : è per questo che si raccomanda il ricorso a dispositivi di acquisizione molto più affidabili ed economici quali le scale di conteggio. Tale soluzione è certamente vantaggiosa nel caso del sistema  $\alpha$  in cui non si ha alcun interesse nel registrare informazioni spettrali, nel sistema  $\gamma$  comporta l'impiego aggiuntivo di discriminatori per selezionare quegli impulsi la cui ampiezza è compresa tra quella relativa alle interazioni nello scintillatore dei gamma emessi dal  $^{214}\text{Pb}$  e dal  $^{214}\text{Bi}$  : in tal caso può essere delicata la scelta della soglia inferiore.

Altra causa importante di perdita dati è certamente l'interruzione di energia elettrica ; ma a questa si può ovviare facilmente con l'utilizzo di un gruppo di continuità dedicato alla stazione di monitoraggio.

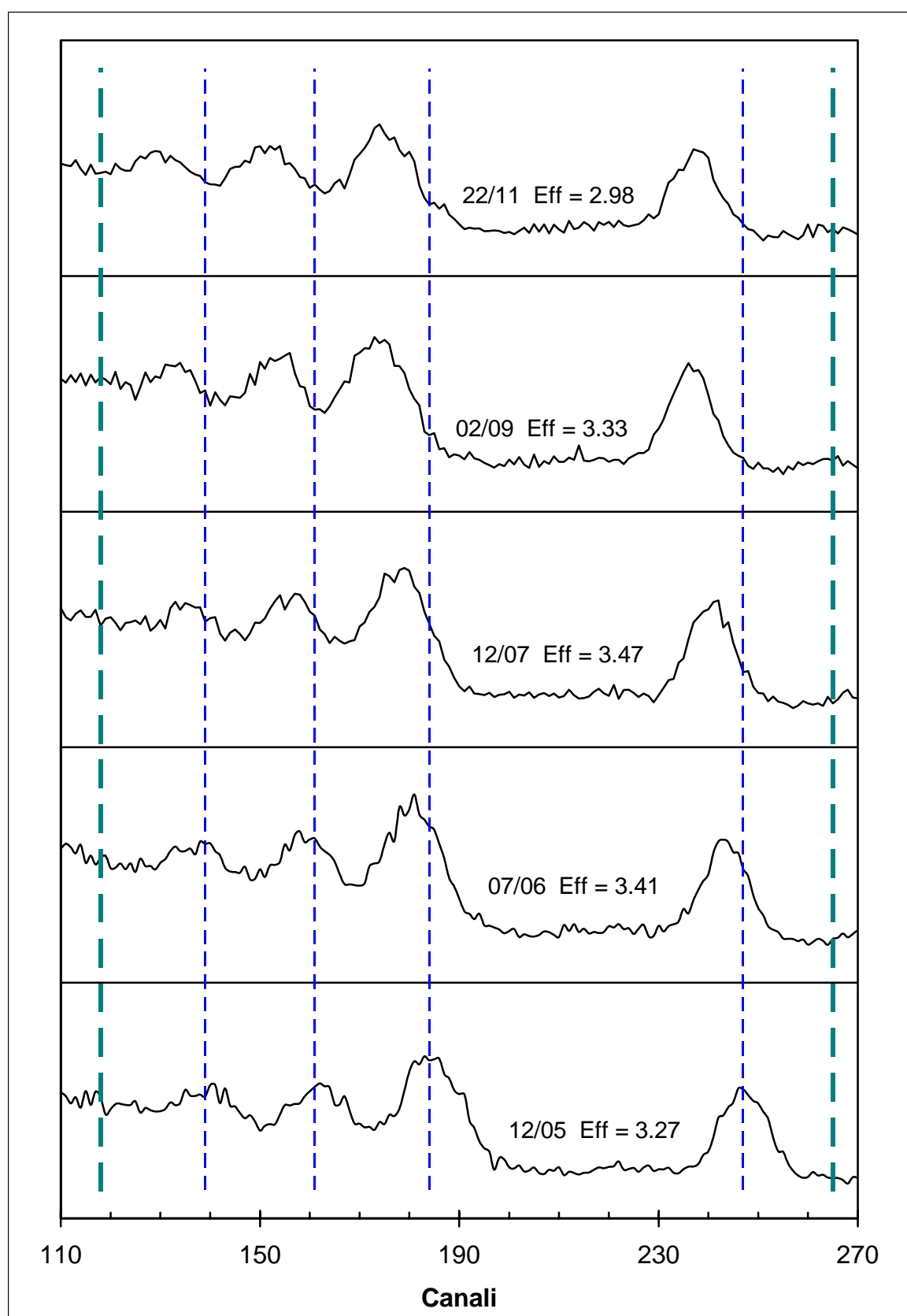
## **6.7. Stabilità della risposta**

L'analisi dei valori di efficienza ha mostrato un soddisfacente grado di stabilità della risposta del sistema  $\alpha$  durante tutto il periodo di sperimentazione protrattosi dal maggio 1999 al gennaio 2000 ; stabilità che è venuta meno per il sistema  $\gamma$  (si veda la figura 6.7).

Fissando l'attenzione sul sistema  $\gamma$ , una ulteriore analisi può essere condotta sulla base della posizione dei picchi negli spettri acquisiti in occasione di calibrazioni svoltesi a distanza nel tempo e in condizioni climatiche differenti. In particolare tra gli spettri studiati figurano quelli relativi a prove di calibrazione in cui si è registrata la massima escursione dei valori di efficienza. Come già ricordato, uno spostamento dei picchi di un numero di canali significativo implicherebbe ad esempio derive dell'elettronica e potrebbe concorrere, insieme alle considerazioni in § 6.4, a spiegare il fenomeno.

Sono stati quindi analizzati gli spettri relativi alle prove di calibrazione del 12/5/99 ( $\text{Eff}_\gamma \sim 3.27 \text{ cpm/Bq l}^{-1}$ ), del 7/6/99 ( $\text{Eff}_\gamma \sim 3.41 \text{ cpm/Bq l}^{-1}$ ), del 12/7/99 ( $\text{Eff}_\gamma \sim 3.47 \text{ cpm/Bq l}^{-1}$ ), del 2/9/99 ( $\text{Eff}_\gamma \sim 3.33 \text{ cpm/Bq l}^{-1}$ ) e del 22/11/99 ( $\text{Eff}_\gamma \sim 2.98 \text{ cpm/Bq l}^{-1}$ ). Per rendere più agevole l'interpretazione del grafico comparativo (figura 6.19) sono state tracciate linee verticali tratteggiate in corrispondenza della posizione dei picchi del  $^{214}\text{Pb}$  e del  $^{214}\text{Bi}$  e dei limiti della ROI (canali  $118 \div 265$ ).

Come accaduto con la scheda multicanale EG&G ORTEC MCB Type 916-002 anche con la scheda EG&G ORTEC  $\mu\text{ACE}$  si è evidenziata una significativa deriva dello spettro, valutabile nell'ordine dei 10 canali a distanza di circa 8 mesi. Inoltre, dalla posizione dei picchi nei vari spettri, risulta chiaro che tale fenomeno non ha influenza sull'andamento a carattere stagionale del valore dell'efficienza di calibrazione ; tuttavia per minimizzare il rapporto segnale rumore si dovrebbe procedere periodicamente alla ridefinizione della ROI.



**Figura 6.19** - Stabilità della risposta del sistema  $\gamma$

## **6.8. Tecnica di analisi mediante albero dei guasti applicata ai sistemi di monitoraggio $\alpha$ e $\gamma$**

### **6.8.1. Descrizione della tecnica**

L'analisi mediante costruzione di un albero dei guasti (FTA : Fault Tree Analysis) è spesso usata per strutturare l'insieme di cause che portano alla realizzazione di un determinato evento incidentale o indesiderato che, per la sua posizione nella organizzazione ad albero, è chiamato 'evento culminante' (Top Event). La frequenza di accadimento del Top Event può essere ricavata dal modello logico costruito.

L'analisi tramite costruzione di alberi dei guasti permette di

- scoprire in maniera deduttiva i guasti ;
- porre in rilievo gli aspetti del sistema che possono provocare guasti o comportamenti non desiderati ;
- andare a fondo nell'analisi del comportamento del sistema ;
- identificare soluzioni per migliorare l'affidabilità del sistema.

È molto importante impostare nel modo più corretto possibile l'albero e cercare di prevederne tutti i possibili sviluppi : in ciò consta la principale sorgente di errori nell'applicazione di tale tecnica di analisi che si articola sui seguenti punti fondamentali :

- 1) Definizione del sistema ;
- 2) Identificazione del Top Event ;
- 3) Costruzione dell'albero dei guasti ;
- 4) Valutazione qualitativa ;
- 5) Valutazione quantitativa.

La definizione del sistema è di importanza primaria. Individuato il Top Event e le sue possibili cause, si cercano le relazioni logiche esistenti tra quest'ultime : si costruisce quindi l'albero dei guasti. A tal fine sono utilizzati dei simboli logici che correlano tra loro i dati in entrata e quelli in uscita da un particolare nodo dell'albero.

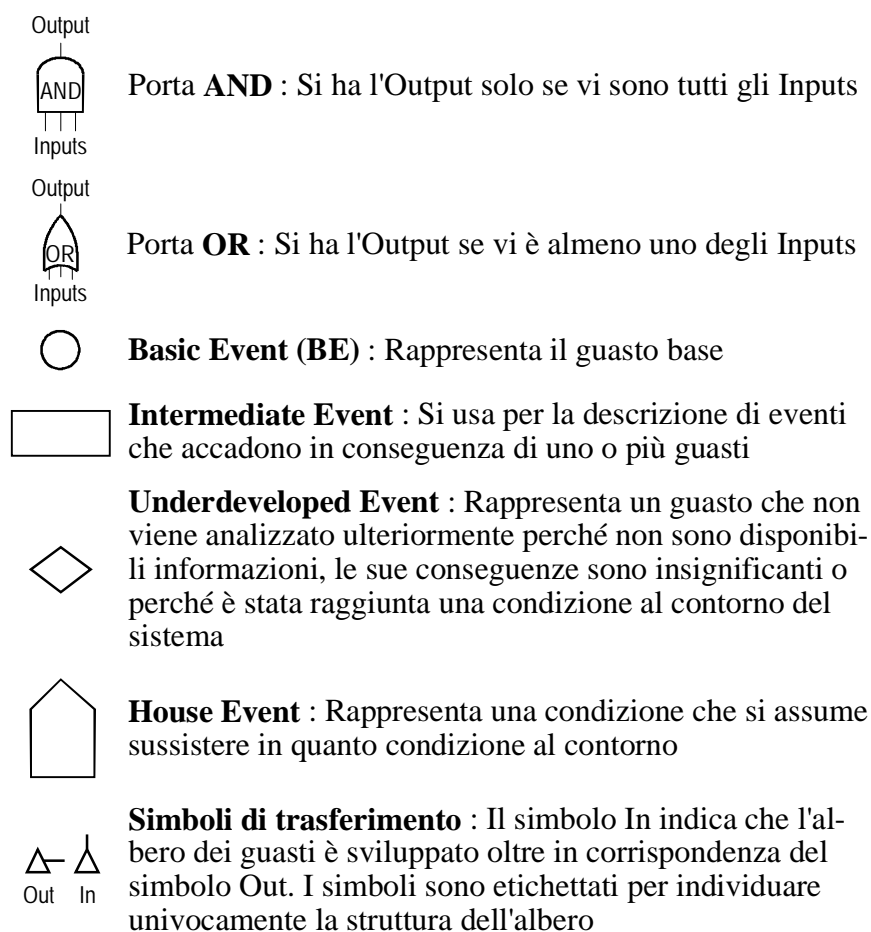
Se devono coesistere due condizioni (input) perché si produca un certo effetto (output), nel nodo relativo si farà uso dell'operatore AND, equivalente a moltiplicare i due input. Sono consentite le seguenti operazioni tra le frequenze e/o probabilità di accadimento degli input : frequenza per probabilità oppure probabilità per probabilità (si tenga presente che l'operazione frequenza per frequenza va riformulata come frequenza per probabilità).

Se basta che si realizzi una delle due condizioni (input) perché si produca un certo effetto (output), nel nodo relativo si farà uso dell'operatore OR, equivalente a sommare i due input. Sono consentite soltanto operazioni su grandezze omogenee.

Nel calcolo della frequenza di accadimento del Top Event per alberi piuttosto semplici si può adottare la tecnica 'gate-by-gate' in cui si procede dagli eventi base (Basic event) verso il Top Event ; ovviamente tutte le probabilità o le frequenze delle cause in ingresso ad un generico nodo devono essere note per poter calcolare probabilità o frequenza dell'effetto prodotto.

### 6.8.2. Simboli impiegati per la costruzione dell'albero degli guasti

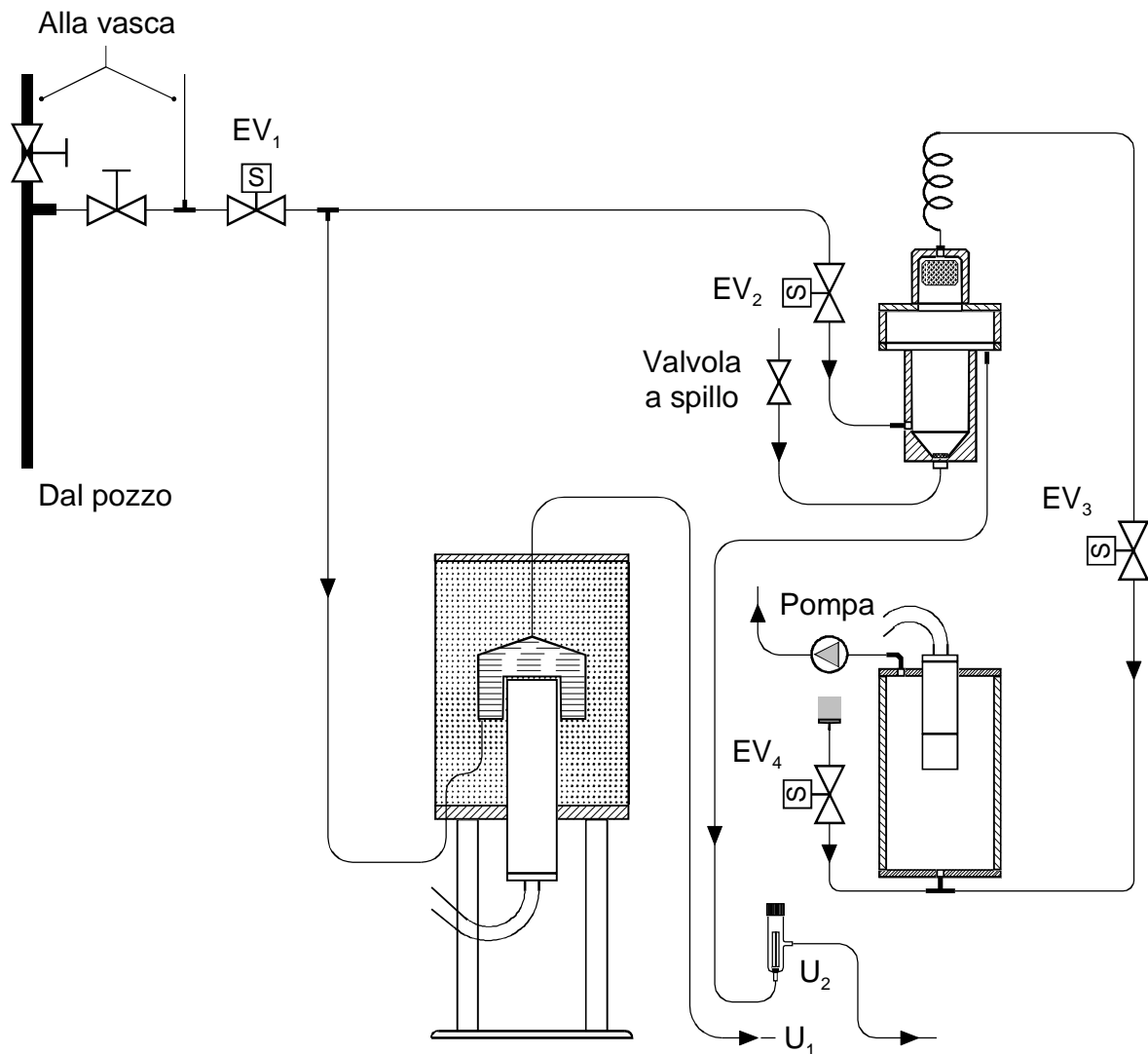
In figura 6.20 sono mostrati i simboli maggiormente impiegati per la costruzione dell'albero dei guasti.



**Figura 6.20** - Simboli impiegati per la costruzione dell'albero dei guasti

### 6.8.3. Schema idraulico di riferimento per la costruzione degli alberi di guasto

Per la costruzione degli alberi di guasto relativi ai principali eventi indesiderati che saranno presi in considerazione si farà riferimento allo schema idraulico di figura 6.21.



**Figura 6.21** - Schema idraulico dei sistemi di monitoraggio installati presso il centro ENEA di Frascati

### 6.8.4. Studio del sistema di monitoraggio $\gamma$

Per il sistema di monitoraggio  $\gamma$  si ritiene opportuno costruire l'albero dei guasti

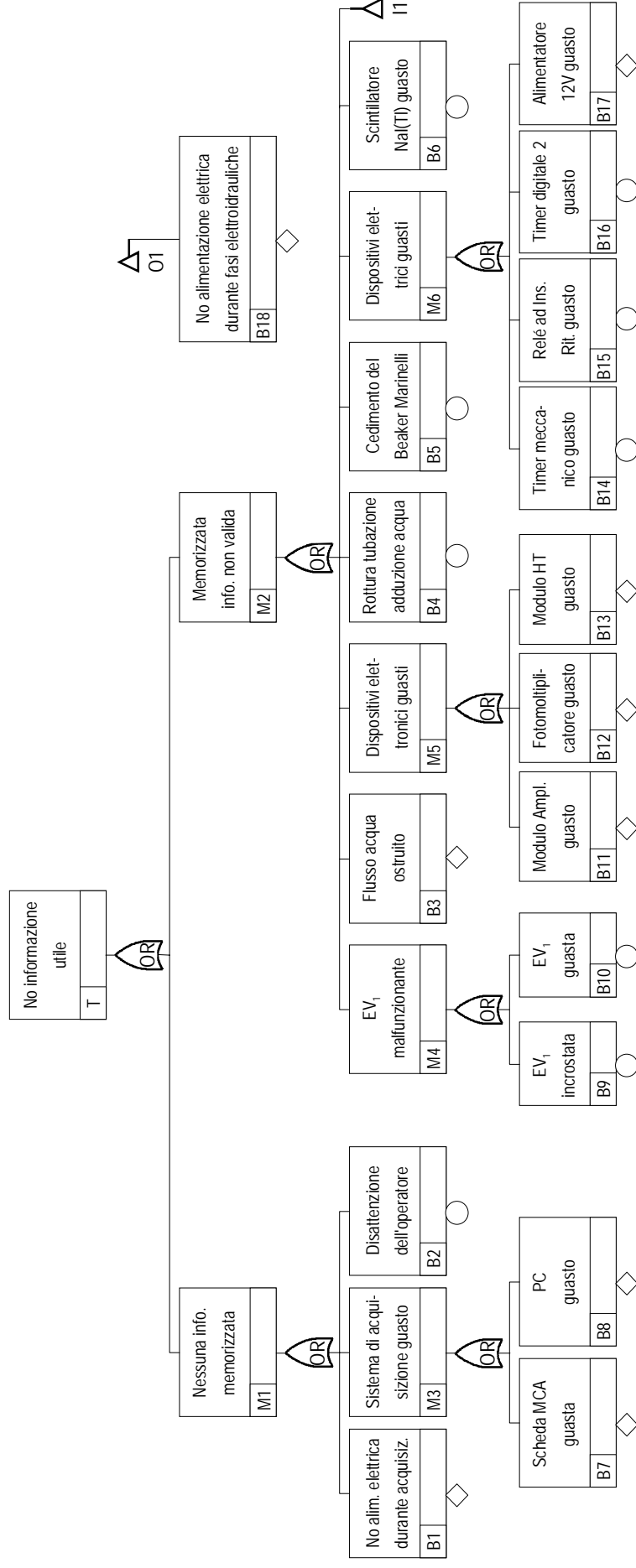
relativo alla *manca*za di informazioni utili riguardo l'effettivo andamento della concentrazione di radon in acqua. Scelto il Top Event si passa ad individuare la catena di eventi da cui ha origine procedendo con il metodo Top-Down. Si ottiene l'albero in figura 6.22 in cui ogni evento (o guasto) è associato ad un codice alfanumerico la cui prima lettera è indicativa della tipologia dell'evento: saranno usate le lettere T (Top Event), M (Intermediate Event) e B (Basic Event); a fianco del codice alfanumerico può essere riportata la frequenza o la probabilità con cui si verifica l'evento.

Una prima distinzione è relativa al fatto se siano state memorizzate informazioni o meno.

Nel primo caso si tratta di informazioni non valide in quanto inficiate da possibili cedimenti del beaker Marinelli, della tubazione di adduzione dell'acqua, dello scintillatore a NaI(Tl), dei dispositivi elettrici o elettronici, da mancanza di energia elettrica durante le fasi elettroidrauliche relative al trasferimento del radon dal campione di acqua nel volume di misura, dall'ostruzione del flusso di acqua o da malfunzionamenti dell'elettrovalvola EV<sub>1</sub>. Quest'ultimo evento può essere causato da incrostazioni o dal guasto dell'elettrovalvola. Il guasto dei dispositivi elettronici può interessare il modulo di alta tensione, il fotomoltiplicatore oppure il modulo di amplificazione; mentre il guasto dei dispositivi elettrici può essere a carico dell'inseritore a tempo meccanico, dell'alimentatore di bassa tensione, del relé ad inserimento ritardato oppure dell'inseritore a tempo digitale 2 che deve commutare la bassa tensione di alimentazione della catena elettronica.

Invece non viene registrata alcuna informazione qualora non vi sia alimentazione elettrica durante la fase di acquisizione, l'operatore non faccia riavviare il ciclo di misure o in caso di guasto del sistema di acquisizione. Quest'ultimo evento può essere causato da guasti della scheda multicanale o del PC su cui è installata.

Per risalire mediante operazioni logiche alla frequenza di accadimento del Top Event occorre conoscere la probabilità o la frequenza con cui si verifica ogni Basic Event: ciò non sempre è agevole, pertanto a volte ci si deve basare sull'esperienza di esercizio dei vari componenti.



**Figura 6.22** - Albero dei guasti relativo all'assenza di un output utile ai fini della determinazione della concentrazione di radon in acqua



#### **6.8.5. Studio del sistema di monitoraggio $\alpha$**

Anche per il sistema di monitoraggio  $\alpha$  si ritiene opportuno costruire l'albero dei guasti relativo alla *mancanza di informazioni utili* riguardo l'effettivo andamento della concentrazione di radon in acqua. Verranno però considerati anche i casi relativi all'allagamento o al rientro moderato di acqua nel cilindro in PVC in quanto ritenuti particolarmente significativi ai fini della salvaguardia del sistema.

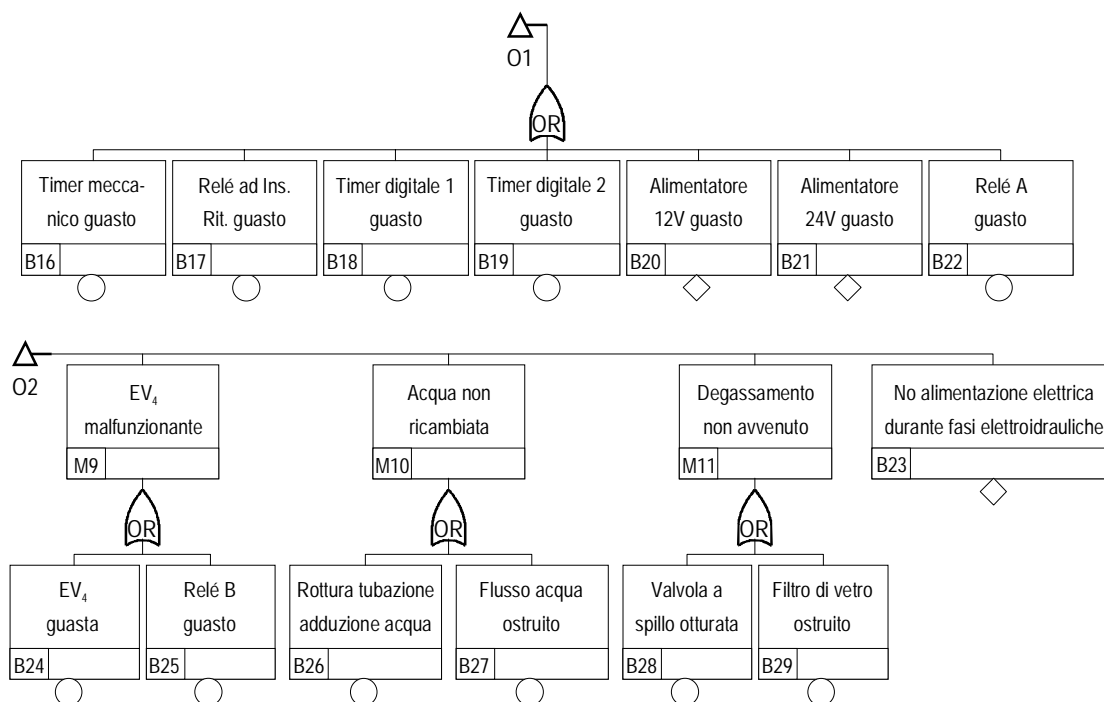
##### *Mancanza di informazioni utili*

La prima distinzione è sempre relativa alla presenza o meno di informazioni memorizzate.

Nel primo caso si tratta di informazioni non valide in quanto inficiate da possibili cedimenti di dispositivi elettrici ed elettronici, da danneggiamenti dello strato di solfuro di zinco della Cella di Lucas, della tubazione di adduzione dell'acqua, da mancanza di energia elettrica durante le fasi elettroidrauliche relative al trasferimento del radon dal campione di acqua nel volume di misura, dall'ostruzione del flusso di acqua, della valvola a spillo e del filtro di vetro per il frazionamento dell'aria di degassaggio o da guasti o incrostazioni delle elettrovalvole. Il guasto dei dispositivi elettronici può interessare il modulo di alta tensione, il fotomoltiplicatore oppure il modulo di processamento del segnale SPM 2; mentre il guasto dei dispositivi elettrici può essere a carico dell'inseritore a tempo meccanico, degli alimentatori di bassa tensione, dei relé oppure degli inseritori a tempo digitali.

Invece non viene registrata alcuna informazione qualora non vi sia alimentazione elettrica durante la fase di acquisizione, l'operatore non faccia riavviare il ciclo di misure o in caso di guasto del sistema di acquisizione, ossia della scheda multicanale o del PC su cui è installata.





**Figura 6.23** - Albero dei guasti relativo all'assenza di un output utile ai fini della determinazione della concentrazione di radon in acqua. *Parte II*

### Allagamento del cilindro in PVC durante la fase di ricambio dei fluidi di processo

**Condizioni al contorno:** Timer meccanico, relé ad inserimento ritardato, timer digitale 1, relé A, C e pompa alimentati e funzionanti; elettrovalvole EV<sub>1</sub> ed EV<sub>2</sub> aperte.

**Descrizione dell'evento:** Se l'elettrovalvola EV<sub>3</sub> (di degassamento) rimane aperta o parzialmente aperta perché guasta e il dispositivo di svuotamento U<sub>2</sub> è bloccato si verifica l'allagamento del cilindro in PVC.

Il fenomeno viene esaltato dall'azione della pompa nel caso in cui l'elettrovalvola EV<sub>4</sub> (di rientro dell'aria nel cilindro in PVC) rimanga chiusa perché guasta oppure perché il relé B è guasto.

### Allagamento del cilindro in PVC durante la fase di degassamento

**Condizioni al contorno:** Timer meccanico, relé ad inserimento ritardato, timer digitale 1, relé A, B, C alimentati e funzionanti; elettrovalvola EV<sub>3</sub> (di degassamento) aperta.

Descrizione dell'evento: Se l'elettrovalvola  $EV_2$  è incrostata e contemporaneamente la valvola a spillo è otturata, acqua può essere richiamata verso il cilindro in PVC dal Beaker Marinelli del sistema  $\gamma$  in quanto lo scarico  $U_1$  è posto ad un dislivello inferiore a  $\sim 6$  m (corrispondenti al grado di vuoto nel cilindro in PVC).

Il fenomeno viene esaltato se anche l'elettrovalvola  $EV_1$  è incrostata.

#### *Rientro di acqua nel cilindro in PVC durante la fase di degassamento*

##### Condizioni al contorno :

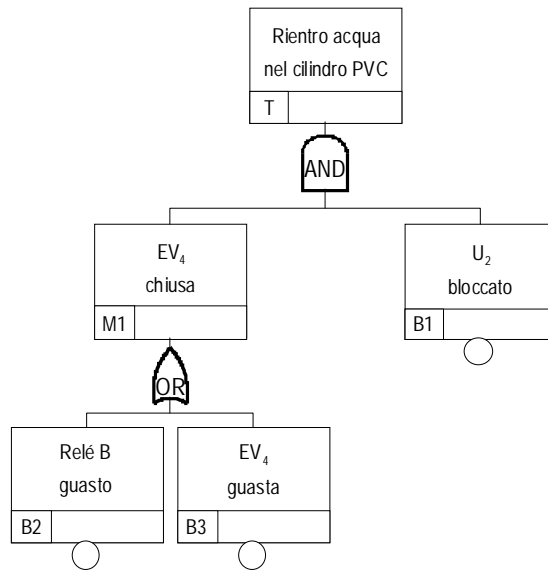
##### *Precedente fase di ricambio dei fluidi di processo :*

Timer meccanico, relé ad inserimento ritardato, timer digitale 1, relé A, C e pompa alimentati e funzionanti; elettrovalvole  $EV_1$  ed  $EV_2$  aperte, elettrovalvola  $EV_3$  (di degassamento) chiusa.

##### *Fase di degassamento :*

Timer meccanico, relé ad inserimento ritardato, timer digitale 1 e relé A alimentati e funzionanti; elettrovalvole  $EV_1$  ed  $EV_2$  chiuse, elettrovalvola  $EV_3$  (di degassamento) aperta.

Descrizione dell'evento : Se il dispositivo di svuotamento  $U_2$  è bloccato e l'elettrovalvola  $EV_4$  (di ricambio dell'aria) rimane chiusa durante la fase di ricambio dei fluidi di processo perché guasta o perché il relé B è guasto, allora nella successiva fase di degassamento si ha rientro di acqua nel cilindro in PVC. In figura 6.24 è riportato l'albero dei guasti.



**Figura 6.24** - Albero dei guasti relativo al rientro di acqua nel cilindro in PVC durante la fase di degassamento

#### 6.8.6. Frequenze di accadimento degli eventi base

Per la valutazione quantitativa della frequenza di accadimento dei vari Top Events considerati si applicherà la tecnica ‘gate-by-gate’ che, come noto, richiede che siano note le frequenze di accadimento dei vari Basic Events. Queste possono essere desunte da schede tecniche, dall’esperienza di esercizio o, in mancanza delle precedenti, da stime cautelative.

##### Frequenze di accadimento desunte da schede tecniche

Pompa KNF Mod. NMP 50 guasta. È garantita per 3000 ore (sostituendo la membrana e le valvole può tornare in esercizio). È attivata 4 volte al giorno per 8’40”, corrispondenti a  $\approx 211$  ore/anno ; pertanto la frequenza di guasto è pari a  $\approx 0.07 \text{ y}^{-1}$

Guasto dei relé. Sono garantiti per  $10^6$  commutazioni (MTTF: Mean Time To Failure) ; tutti i relé impiegati nei sistemi di monitoraggio descritti sono attivati 4 volte al giorno, pertanto si hanno  $2 \cdot 4 \cdot 365 = 2920$  commutazioni/anno, corrispondenti ad una frequenza di guasto pari a  $2920/10^6 \approx 3 \cdot 10^{-3} \text{ y}^{-1}$ .

Guasto degli inseritori a tempo. Valgono le stesse considerazioni fatte per i relé, pertanto la frequenza di guasto è pari a  $\approx 3 \cdot 10^{-3} \text{ y}^{-1}$ .

Guasto delle elettrovalvole. Sono garantite per circa  $10^6$  cicli (MTTF : Mean Time To Failure) ; tutte le elettrovalvole impiegate nei sistemi di monitoraggio descritti sono attivate 4 volte al giorno, pertanto si hanno  $4 \cdot 365 = 1460$  cicli/anno, corrispondenti ad una frequenza di guasto pari a  $1460/10^6 \approx 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ y}^{-1}$ .

Frequenze di accadimento desunte dall'esperienza di esercizio

Elettrovalvola incrostata. Il problema si è verificato soltanto su 3 elettrovalvole attraversate da acqua, dopo periodi di inattività. Poiché tutte le elettrovalvole a contatto con l'acqua hanno funzionato per complessivi 57 mesi si è dedotta una frequenza di incrostamento pari a  $\approx 0.6 \text{ y}^{-1}$ . Tale stima, attribuita ai componenti in funzionamento ordinario, è cautelativa in quanto non considera la circostanza scatenante l'evento indesiderato : la temporanea inattività.

Assenza di alimentazione elettrica durante l'acquisizione :  $\approx 5 \text{ y}^{-1}$

Assenza di alimentazione elettrica durante il ciclo elettroidraulico :  $\approx 2 \text{ y}^{-1}$

Disattenzione dell'operatore :  $\approx 0.5 \text{ y}^{-1}$

Guasto del personal computer :  $\approx 0.3 \text{ y}^{-1}$

Guasto della scheda di acquisizione :  $\approx 0.2 \text{ y}^{-1}$

Frequenze di accadimento desunte da stime cautelative del MTTF

Fotomoltiplicatore guasto :  $\approx 0.05 \text{ y}^{-1}$

Modulo di alta tensione guasto :  $\approx 0.05 \text{ y}^{-1}$

Modulo di processamento del segnale SPM 2 guasto :  $\approx 0.05 \text{ y}^{-1}$

Partitore - preamplificatore TENNELEC TC 155A guasto :  $\approx 0.05 \text{ y}^{-1}$

Alimentatore BT guasto :  $\approx 0.15 \text{ y}^{-1}$

Rottura tubazione in silicone :  $\approx 0.05 \text{ y}^{-1}$

Cedimento del beaker Marinelli :  $\approx 0.05 \text{ y}^{-1}$

Danneggiamento dello strato di solfuro di zinco della cella di Lucas :  $\approx 0.05 \text{ y}^{-1}$

Danneggiamento del cristallo NaI(Tl) :  $\approx 0.02 \text{ y}^{-1}$

Condotto di scarico  $U_1$  ostruito : trascurabile

Dispositivo di scarico  $U_2$  ostruito : trascurabile

Valvola a spillo otturata :  $\approx 0.2 \text{ y}^{-1}$

Flusso di acqua ostruito :  $\approx 0.1 \text{ y}^{-1}$  (si tenga presente che l'acqua può essere filtrata a monte dei sistemi di monitoraggio).

Filtro di vetro otturato :  $\approx 1 \text{ y}^{-1}$

#### **6.8.7. Valutazione delle frequenze di accadimento dei Top Events**

##### ***Sistema $\gamma$***

##### **Mancanza di informazioni utili**

$$\begin{aligned} T = & (B1 + (B7 + B8) + B2) + ((B9 + B10) + B3 + (B11 + B12 + B13) + B4 + B5 + (B14 + B15 + \\ & + B16 + B17) + B6 + B18) = (5 + (0.2 + 0.3) + 0.5) + ((0.6 + 0.0015) + 0.1 + (0.05 + 0.05 + \\ & + 0.05) + 0.05 + 0.05 + (0.003 + 0.003 + 0.003 + 0.15) + 0.02 + 2) = 9.1305 \text{ y}^{-1} \end{aligned}$$

Pertanto utilizzando una scala di conteggio (in luogo di una scheda MCA su PC) ed un gruppo di continuità che garantisca un'elevata autonomia si può scendere a  $\sim 2.6 \text{ y}^{-1}$ , assumendo che la frequenza di indisponibilità dell'alimentazione elettrica scenda a  $\sim 1 \text{ y}^{-1}$ .

Con un'adeguata manutenzione dell'elettrovalvola  $EV_1$ , in dipendenza del grado di purezza dell'acqua, e con l'impiego di procedure automatiche per l'elaborazione e la trasmissione dei dati la frequenza con cui non si hanno informazioni utili scende ulteriormente a  $\sim 1.5 \text{ y}^{-1}$ .

##### ***Sistema $\alpha$***

##### **Mancanza di informazioni utili**

$$T = (B1 + (B5 + B6) + B2) + ((B7 + B8) + B3 + (B9 + B10 + B11) + B4 + (B12 + B13) + (B16 + B17 + B18 + B19 + B20 + B21 + B22) + (B14 + B15) + (B24 + B25) + (B26 + B27) + (B28 + B29) + B23) = (5 + (0.2 + 0.3) + 0.5) + ((0.07 + 0.003) + 0.05 + (0.05 + 0.05 + 0.05) + 0.0015 + (0.6 + 0.0015) + (0.003 + 0.003 + 0.003 + 0.003 + 0.15 + 0.15 + 0.003) + (0.6 + 0.0015) + (0.0015 + 0.003) + (0.05 + 0.1) + (0.2 + 1) + 2) = 11.147 \text{ y}^{-1}$$

Pertanto utilizzando una scala di conteggio (in luogo di una scheda MCA su PC) ed un gruppo di continuità che garantisca un'elevata autonomia si può scendere a  $\sim 4.6 \text{ y}^{-1}$ , assumendo che la frequenza di indisponibilità dell'alimentazione elettrica scenda a  $\sim 1 \text{ y}^{-1}$ .

Con un'adeguata manutenzione del filtro di vetro e delle elettrovalvole  $EV_1$  ed  $EV_2$ , in dipendenza del grado di purezza dell'acqua, e con l'impiego di procedure automatiche per l'elaborazione e la trasmissione dei dati la frequenza con cui non si hanno informazioni utili scende ulteriormente a  $\sim 1.9 \text{ y}^{-1}$ .

#### Allagamento del cilindro in PVC durante la fase di ricambio dei fluidi di processo

Tale evento è alquanto improbabile grazie all'impiego di un dispositivo di svuotamento a sicurezza passiva in luogo di un'elettrovalvola ; infatti la frequenza con cui si verifica è pari a :

$$T = (0.0015 \cdot 0.0001) = 1.5 \cdot 10^{-7} \text{ y}^{-1}$$

La frequenza con cui si verifica l'evento esaltato dalla mancata apertura dell'elettrovalvola  $EV_4$  è ancora più bassa e pari a :

$$T = (0.0015 \cdot 0.0001 \cdot (0.0015 + 0.003)) = 6.75 \cdot 10^{-10} \text{ y}^{-1}$$

#### Allagamento del cilindro in PVC durante la fase di degassamento

La frequenza con cui si verifica tale evento è pari a :

$$T = (0.6 \cdot 0.2) = 0.12 \text{ y}^{-1}$$



Può comunque essere reso relativamente improbabile con un'adeguata manutenzione dell'elettrovalvola e della valvola a spillo.

La frequenza con cui si verifica l'evento esaltato dalla contemporanea incrostazione dell'elettrovalvola EV<sub>1</sub> è ancora più bassa e pari a :

$$T = ((0.6 \cdot 0.2) \cdot 0.6) = 0.072 \text{ y}^{-1}$$

#### Rientro di acqua nel cilindro in PVC durante la fase di degassamento

Anche tale evento è alquanto improbabile grazie all'impiego di un dispositivo di svuotamento a sicurezza passiva in luogo di un'elettrovalvola ; infatti la frequenza con cui si verifica è pari a :

$$T = ((0.003 + 0.0015) \cdot 0.0001) = 4.5 \cdot 10^{-7} \text{ y}^{-1}$$

#### **6.8.8. Considerazioni a conclusione dell'analisi di sicurezza**

Da quanto emerso nel § 6.8.7 è possibile concludere che gli eventi più dannosi per il sistema  $\alpha$  hanno frequenze di accadimento decisamente basse, ad eccezione dell'*allagamento del cilindro in PVC durante la fase di degassamento* : in questo caso si raccomanda una periodica manutenzione dell'elettrovalvola EV<sub>2</sub> e della valvola a spillo.

Accettabile è la frequenza con cui si ha mancanza di dati utili, ed è chiaramente maggiore nel caso del sistema  $\alpha$  in virtù della sua maggiore complessità.

## 7. Sovrapposizione dei dati sismici

### 7.1. Confronto fra la concentrazione di radon in acqua e la magnitudo

Confrontando i dati forniti dall'Istituto Nazionale di Geofisica con quelli provenienti dai sistemi di monitoraggio  $\alpha$  e  $\gamma$  si è cercato di mettere in relazione la concentrazione di radon in acqua e l'intensità degli eventi sismici nella zona dei Castelli Romani. In particolare si è studiata la sismicità di un'area compresa nel raggio di 30 km da Frascati (Latitudine 41.807 Longitudine 30.000). Nel periodo di osservazione si sono verificate solo scosse abbastanza lievi che non hanno permesso di evidenziare eventuali correlazioni. La magnitudo e l'energia rilasciata dagli eventi sismici nel 1999 e le concentrazioni medie settimanali nel periodo compreso tra il novembre 1998 e il gennaio 2000 sono riportate rispettivamente nelle tabelle 7.1 e 7.2.

Nella tabella 7.1 con le lettere A, B e C si fa riferimento alle seguenti strutture interessate dall'epicentro del sisma :

A : Struttura vulcanica Colli Albani a S - SW di Frascati, zona Ardea - Campoleone ;

B : Struttura a NE di Frascati, propinquità appenniniche Monti Tiburtini ;

C : Struttura a SE di Frascati, propinquità appenniniche carbonatiche Monti Lepini

Data	Distanza dalla stazione (km)	Profondità (km)	Struttura interessata dal sisma	Magnitudo	Energia rilasciata (J)
16/01/99	29.2	10.0	B	2.4	2.5E+08
14/02/99	18.4	19.2	A	2.1	8.9E+07
14/02/99	25.1	7.5	A	2.2	1.3E+08
16/02/99	20.9	5.0	B	3.3	5.6E+09
20/03/99	11.0	27.6	B	2.0	6.3E+07
01/05/99	15.2	10.7	A	2.3	1.8E+08
03/05/99	20.2	5.0	A	2.1	8.9E+07
07/05/99	15.6	8.2	A	2.0	6.3E+07
04/06/99	20.3	9.8	A	2.3	1.8E+08
19/07/99	28.2	5.1	C	2.4	2.5E+08
13/09/99	20.3	5.0	B	2.4	2.5E+08
30/10/99	27.4	10.0	B	2.1	8.9E+07
31/10/99	9.9	5.0	B	2.7	7.1E+08
31/10/99	11.1	5.0	B	3.0	2.0E+09
01/11/99	10.6	5.0	B	2.2	1.3E+08

**Tabella 7.1** - Dati sismici nel 1999 di un'area compresa nel raggio di 30 km da Frascati

Data	Concentrazione media (Bq/l)	Data	Concentrazione media (Bq/l)	Data	Concentrazione media (Bq/l)
13/11/1998	188 ± 7	27/03/1999	221 ± 3	10/09/1999	218 ± 6
21/11/1998	193 ± 6	14/05/1999	218 ± 6	17/09/1999	215 ± 6
28/11/1998	204 ± 6	21/05/1999	220 ± 5	24/09/1999	207 ± 5
05/12/1998	214 ± 3	28/05/1999	226 ± 6	28/09/1999	229 ± 6
12/12/1998	214 ± 2	10/06/1999	224 ± 5	14/10/1999	201 ± 4
19/12/1998	217 ± 5	17/06/1999	220 ± 6	21/10/1999	200 ± 3
02/01/1999	219 ± 3	24/06/1999	220 ± 6	28/10/1999	208 ± 4
09/01/1999	223 ± 4	01/07/1999	229 ± 6	04/11/1999	205 ± 4
16/01/1999	224 ± 4	08/07/1999	229 ± 7	11/11/1999	199 ± 3
01/02/1999	213 ± 4	15/07/1999	230 ± 6	18/11/1999	198 ± 2
07/02/1999	224 ± 3	22/07/1999	230 ± 6	25/11/1999	211 ± 3
14/02/1999	221 ± 4	26/07/1999	226 ± 5	02/12/1999	214 ± 3
21/02/1999	227 ± 5	06/08/1999	225 ± 5	09/12/1999	212 ± 3
28/02/1999	225 ± 5	13/08/1999	220 ± 5	16/12/1999	215 ± 3
07/03/1999	217 ± 4	20/08/1999	223 ± 4	23/12/1999	214 ± 6
14/03/1999	225 ± 5	29/08/1999	222 ± 6	30/12/1999	207 ± 6
21/03/1999	230 ± 4	04/09/1999	219 ± 6	06/01/2000	208 ± 4

**Tabella 7.2** - Concentrazione di radon in acqua nel periodo novembre 1998 ÷ gennaio 2000

In figura 7.1 sono graficati i dati contenuti nelle tabelle 7.1 e 7.2 : l'asse di sinistra si riferisce ai valori di concentrazione espressi in Bq/l, l'asse di destra si riferisce all'intensità dei sismi espressa in magnitudo.

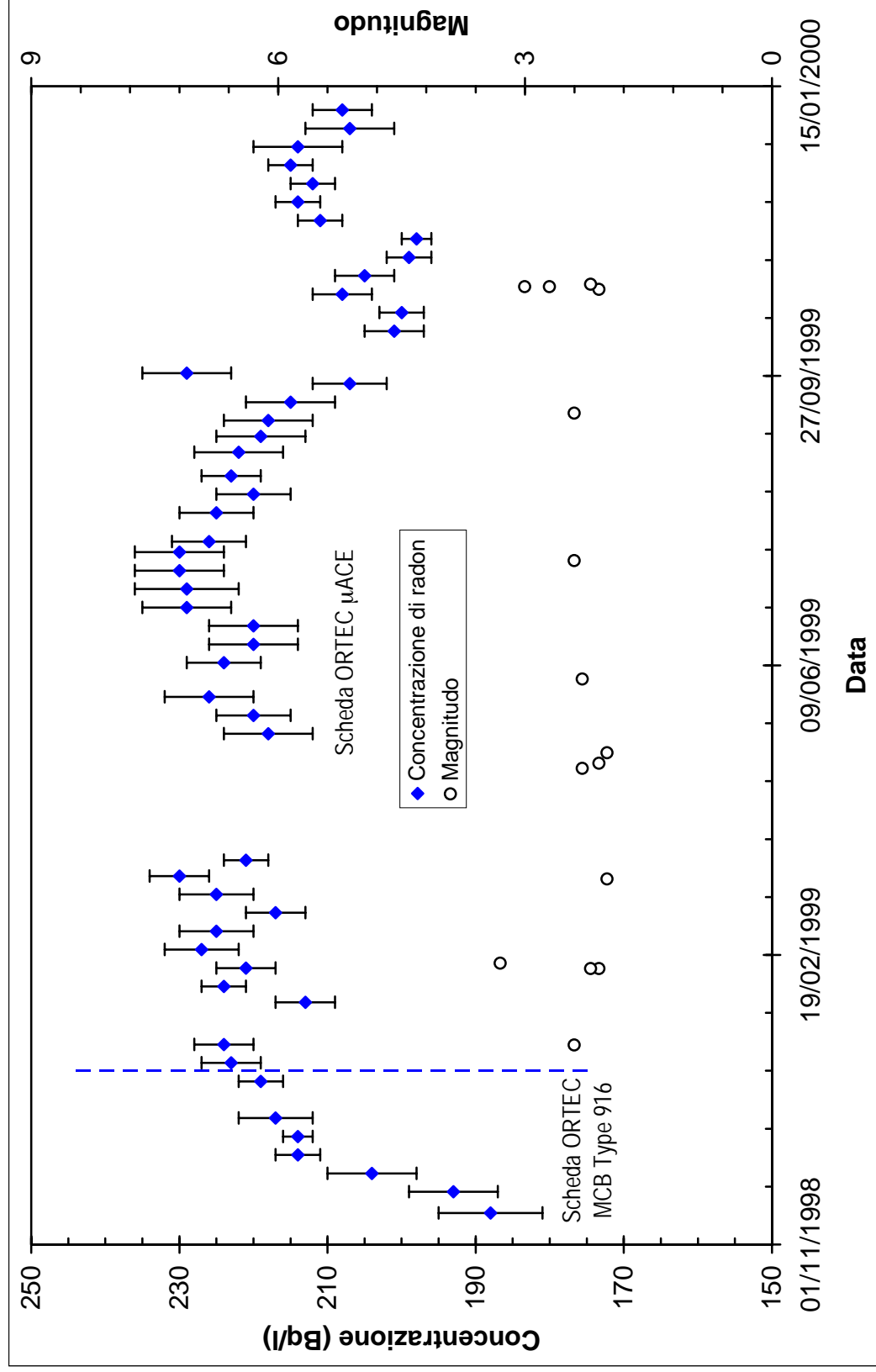
In figura 7.2 il confronto con i dati sismici è stato fatto in termini di energia (J) rilasciata dall'evento, ricavata in funzione della magnitudo M dalla relazione :

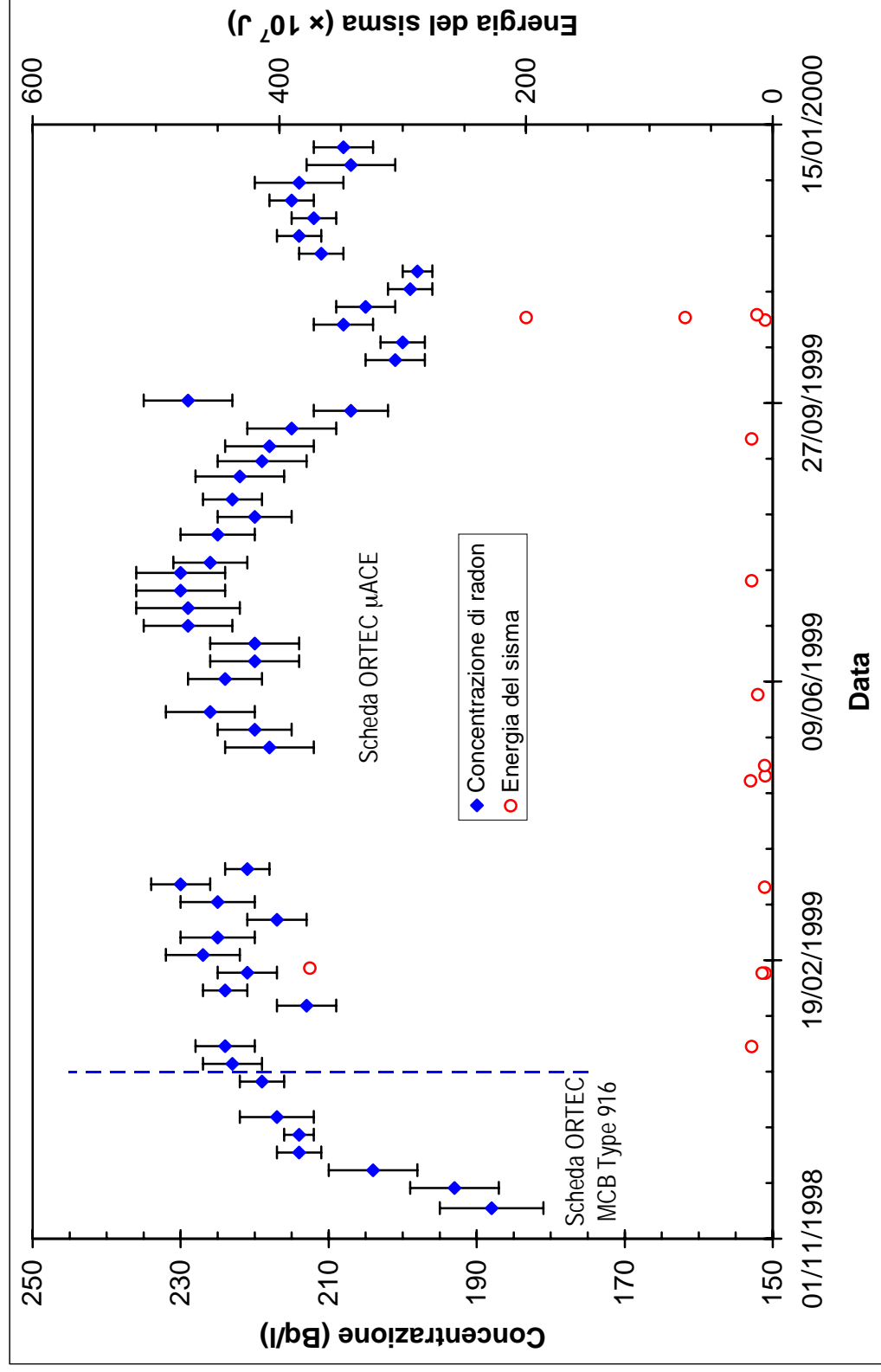
$$\log E(J) = 4.8 + 1.5 \cdot M$$

valida per zone vulcaniche.

Si è inoltre utilizzato un criterio semplificativo in base al quale le energie in tabella 7.2 sono state ridotte di 1/3 se l'evento sismico si è verificato ad una distanza superiore a ~ 15 km dalla stazione di monitoraggio : avendo introdotto un simile fattore di peso, seppur grossolano, sono stati resi maggiormente confrontabili i dati.

Dall'analisi delle figure 7.1 e 7.2 si rileva un lieve decremento della concentrazione di radon in corrispondenza degli eventi sismici dal 30/10 al 1/11.





## Conclusioni

Entrambi i sistemi sviluppati si sono dimostrati adatti all'impiego presso una stazione di monitoraggio della concentrazione di radon in acqua ; importanti caratteristiche quali affidabilità e stabilità della risposta possono essere migliorate modificando principalmente la catena di elaborazione del segnale e facendo ricorso ad un gruppo di continuità.

La stabilità della risposta è un parametro certamente critico per il sistema  $\gamma$ , non soltanto per derive della catena di trattamento ed elaborazione del segnale ; pertanto anche l'impiego di discriminatori e scale di conteggio deve essere attentamente valutato, tenendo conto degli effetti di temperatura sul rivelatore a NaI(Tl).

Il sistema  $\alpha$  è piuttosto leggero non avendo bisogno di schermaggio e quindi risulta pratico da trasportare nel sito prescelto. Al contrario il sistema  $\gamma$  è nel complesso molto pesante in quanto lo spettrometro è dotato di uno schermo in piombo, necessario per migliorare parametri quali il rapporto segnale/rumore e la minima attività rivelabile.

Per tempi di acquisizione di 60 minuti la minima attività rivelabile del sistema  $\alpha$  è dell'ordine della frazione di Bq/l ed è influenzata principalmente dalla concentrazione di radon nell'aria impiegata per degassare il campione di acqua e per ricambiare l'atmosfera all'interno del cilindro che ospita la cella di Lucas ; per il sistema  $\gamma$  al contrario non si scende sotto il valore di circa 2 Bq/l, ritenuto comunque soddisfacente qualora la concentrazione di radon nell'acqua da monitorare non sia eccessivamente bassa. Occorre peraltro notare che le acque naturali hanno, nella maggior parte dei casi, concentrazioni maggiori di 5 Bq/l e che si può migliorare la sensibilità del sistema  $\gamma$  (i.e. la MDA) aumentando il tempo di misura (a scapito della frequenza con cui viene prelevato e misurato il campione di acqua) o lo spessore dello schermo.

Qualora per il sistema  $\gamma$  si opti comunque per l'impiego di una scheda multicanale, traendo vantaggio dalla possibilità di verificare l'informazione spettrale memorizzata, questo avrebbe un costo superiore a quello del sistema  $\alpha$  che al contrario, in virtù del segnale prodotto dal rivelatore, non dà informazioni spettrali di rilievo e quindi può far uso di un semplice contatore di impulsi.

Se le acque da monitorare sono particolarmente aggressive è preferibile l'uso del sistema  $\gamma$ . La cella di Lucas avrebbe infatti un tempo di vita limitato in quanto lo strato di solfuro di zinco verrebbe a diretto contatto con gas che si sviluppano in presenza di acqua,

quali l'acido solfidrico, danneggiandosi. Inoltre si deve considerare che il cilindro in PVC in cui è alloggiata la cella di Lucas è sottoposto ciclicamente a depressione e che in determinate condizioni sono favoriti fenomeni di condensa dell'acqua presente nell'aria di degassamento.

Il sistema  $\gamma$  presenta inoltre un funzionamento molto semplice dal punto di vista idraulico (ed elettrico) che lo fa preferire a quello con cella di Lucas nel caso si debbano monitorare acque particolarmente torbide.

## Bibliografia

1. UNSCEAR. "Sources, effects and risks of ionizing radiation". Report to the General Assembly. United Nations New York 1993
2. UNEP. "Radiation: Doses, Effects, Risks". 1985
3. Annals of the ICRP. "Lung cancer risk from indoor exposures to radon daughters". ICRP n° 50, 1987
4. M. A. R. Iyengar : "The natural distribution of Radium", IAEA, 1990
5. J. Michel : "Sources", Radon Environmental Behaviour, Pergamon Press, New York, 1998
6. G. Igarashi et al. : "Ground-water radon anomaly before the Kobe earthquake in Japan", Science, vol. 269, 1995
7. Bernardini L. "Misura in continuo della concentrazione di radon in acqua". Tesi di laurea. Dipartimento di Ingegneria Nucleare e Conversioni di Energia. Università degli Studi di Roma "La Sapienza", 1997.
8. Vecchiet M. "Misura della concentrazione di radon in acqua". Tesi di laurea. Dipartimento di Ingegneria Nucleare e Conversioni di Energia. Università degli Studi di Roma "La Sapienza", 1996.
9. Ferri M. "Misura in continuo della concentrazione di radon in acqua mediante cella a scintillazione di Lucas". Tesi di laurea. Dipartimento di Ingegneria Nucleare e Conversioni di Energia. Università degli Studi di Roma "La Sapienza", 1997.
10. G. Galli, C. Mancini, F. Quattrocchi "Temporized measurement of groundwater radon concentration by alpha-scintillation counting, for continuous monitoring addressed to natural hazards surveillance". Pure and Applied Geophysics, 157 (2000).
11. Savini S. "Misura in continuo della concentrazione di radon in acqua di falda". Tesi di laurea. Dipartimento di Ingegneria Nucleare e Conversioni di Energia. Università degli Studi di Roma "La Sapienza", 1998.
12. Taylor J. R. "Introduzione all'analisi degli errori". 1986.

*Altri riferimenti sono in calce alle pubblicazioni in allegato*



# Esposizione alla radioattività ambientale

*G. Galli, C. Mancini*

*Università degli Studi di Roma "La Sapienza"  
Dipartimento di Ingegneria Nucleare e Conversioni di Energia*

Pubblicato sulla rivista *INGEGNERIA NUCLEARE E TECNOLOGIE  
ENERGETICHE* Anno 38 (16) n. 1 - 4 gennaio - agosto 1996

# INDICE

<b>1. Radioattività naturale</b>	A-1
1.1. Raggi cosmici	A-1
1.2. Nuclidi cosmogenici	A-3
1.3. Radiazione terrestre	A-3
1.3.1. Irraggiamento esterno	A-7
1.3.2. Irraggiamento interno	A-8
<b>2. Incremento della radiazione di fondo per i contributi dovuti a pratiche umane</b>	A-9
2.1. Sorgenti e radiazioni in campo medico	A-9
2.2. Produzione di energia	A-11
2.3. Produzione di energia elettronucleare	A-12
2.4. Ricadute radioattive da esplosioni nucleari (Fall-Out)	A-13
2.5. Esposizioni a seguito di incidenti	A-16
2.6. Esposizioni professionali	A-18
2.7. Altre sorgenti	A-19
<b>3. Inalazione di radon, grandezze dosimetriche ed effetti</b>	A-20
3.1. Grandezze dosimetriche	A-20
3.1.1. Energia Potenziale Alfa	A-20
3.1.2. Concentrazione di Energia Potenziale Alfa in aria (PAEC)	A-21
3.1.3. Concentrazione Equilibrio Equivalente di Radon in aria (EEC)	A-23
3.1.4. Fattore di equilibrio in aria (F)	A-23
3.1.5. Esposizione	A-24
3.2. Cancro polmonare indotto da radiazione	A-24
3.2.1. Studi epidemiologici	A-24
3.2.2. Relazione tra esposizione e rischio	A-25
3.3. Valutazione dell'esposizione annua	A-26
3.4. Considerazioni dosimetriche sul comportamento dei prodotti di decadimento del $^{222}\text{Rn}$	A-28
<b>Appendice 1. Equilibrio secolare</b>	A-30
<b>Appendice 2. Caratteristiche dei nuclidi cosmogenici</b>	A-31
<b>Bibliografia</b>	

## 1. Radioattività naturale

I raggi cosmici, i nuclidi cosmogenici, i nuclidi primordiali ed i nuclidi radioattivi delle famiglie naturali rappresentano una fonte di radiazione, detta radiazione di fondo, che dà irraggiamento sia interno che esterno. Nella tabella 1 [1] sono riportati i valori di dose media annua riferiti alla popolazione mondiale che, con  $5.3 \times 10^9$  individui, totalizza una dose equivalente collettiva di  $1.3 \times 10^7$  Sv-uomo anno<sup>-1</sup>. Le aree con elevate esposizioni sono abitate da gruppi della popolazione numericamente significativi.

Componente di esposizione	Dose equivalente annua (mSv)	
	In aree con fondo normale	In aree ad elevate esposizioni
Raggi cosmici	0.38	2.0
Radionuclidi cosmogenici	0.01	0.01
Radiazione terrestre: <i>esposizione esterna</i>	0.46	4.3
Radiazione terrestre: <i>esposizione interna (escludendo il radon)</i>	0.23	0.6
Radiazione terrestre: <i>esposizione interna da radon e suoi prodotti di decadimento</i>		
Inalazione di <sup>222</sup> Rn	1.2	10
Inalazione di <sup>220</sup> Rn	0.07	0.1
Ingestione di <sup>222</sup> Rn	0.005	0.1
Totale	2.4	-

**Tabella 1** - Dose equivalente annua da sorgenti naturali di radiazioni ionizzanti

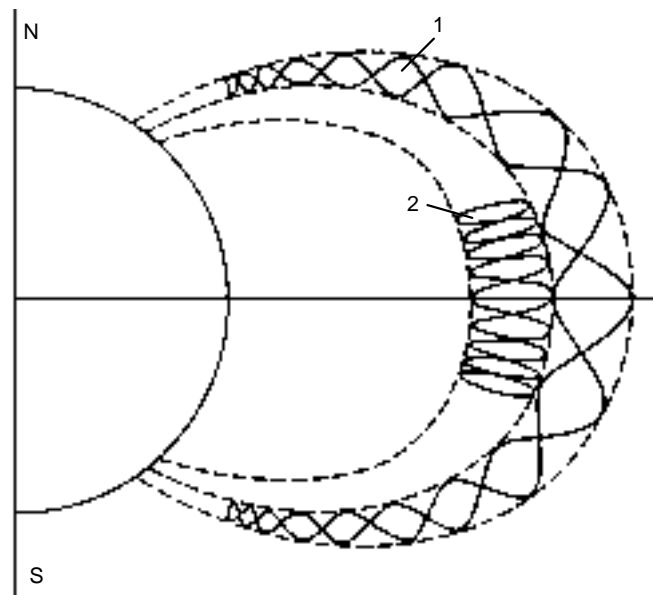
### 1.1. Raggi cosmici

Inducono irraggiamento esterno. Si compongono di due componenti distinte, la radiazione primaria e la secondaria; la prima può essere ulteriormente suddivisa, a seconda dell'origine, in una componente galattica ed in una componente solare di minor rilevanza.

Al di fuori dell'atmosfera terrestre, a latitudini maggiori di 55°, i raggi cosmici sono costituiti da particelle cariche positivamente, in gran parte protoni, di energia compresa per lo più tra 10<sup>2</sup> e 10<sup>5</sup> MeV ma possono raggiungere valori molto più alti.

Le particelle, non appena giungono in prossimità della Terra, risentono dell'azione deviante del campo magnetico terrestre e, per poter giungere al livello del suolo, devono avere una notevole quantità di moto; nel caso contrario, esse finiscono con l'essere imprigionate dal campo magnetico terrestre, dando luogo alle cinture di radiazioni (elettroni e protoni con energia minore di qualche GeV) osservate ad altitudini superiori a qualche migliaio di chilometri dalla terra in posizione simmetrica rispetto all'equatore magnetico e note come cinture di Van Allen. Le particelle si muovono su traiettorie spiraleggianti intorno alle linee di forza del campo magnetico terrestre con raggi di curvatura che vanno, a seconda dell'energia,

da alcune centinaia di metri fino ad alcuni chilometri ed oscillano tra gli emisferi nord e sud (figura 1) [2]. Le cinture si estendono tra  $\pm 60^\circ$  di latitudine [2] [3].



**Figura 1** - Movimento delle particelle cariche. Fasce di radiazione in un piano passante per il polo magnetico. 1: *Elettroni*; 2: *Protoni* [2]

I raggi cosmici secondari provengono dall'interazione dei raggi cosmici primari con l'atmosfera terrestre. Quando le particelle ad alta energia urtano gli atomi degli elementi presenti nell'aria, vengono emessi numerosi prodotti secondari quali mesoni, elettroni, fotoni, protoni e neutroni. Queste particelle prima di giungere sulla superficie della Terra possono decadere o creare altre particelle secondarie: da un singolo evento primario può risultare uno sciame di particelle il cui numero può raggiungere il valore di  $10^8$ . I raggi cosmici primari vengono prevalentemente assorbiti nello strato più alto dell'atmosfera. A circa 20 Km dal livello del mare i raggi cosmici sono quasi interamente di natura secondaria. A tale quota è anche il massimo della dose che aumenta dall'estremo limite dell'atmosfera in quanto, sebbene l'intensità della radiazione primaria decresca, si verifica in compenso un aumento dei prodotti secondari. Al di sotto dei 20 Km la dose decresce a causa dell'attenuazione anche delle particelle secondarie. Si distinguono due componenti: neutronica e ionizzante. La componente neutronica in termini di dose assorbita dà un contributo inferiore a quello della componente ionizzante, ma tale contributo diviene molto più rilevante in termini di dose equivalente.

Nella tabella 2 [1] sono riportati i valori di dose equivalente annua per siti che vanno dal livello del mare fino a circa 4000 m. Si noti come la componente neutronica cresca con la quota più fortemente della componente ionizzante. Il valore medio mondiale della dose annua è di 0.38 mSv.

A causa del campo magnetico terrestre l'intensità dei raggi cosmici varia, se pur moderatamente, con la latitudine. L'energia necessaria ad una particella carica per raggiungere la superficie terrestre, infatti, è più grande all'altezza dell'equatore geomagnetico che non ad altre latitudini. Pertanto l'intensità cresce dall'equatore geomagnetico fino a latitudini tra i  $45^\circ$  ed i  $50^\circ$ ; al di sopra dei  $50^\circ$  essa rimane all'incirca costante. [3]

In Italia si valuta in media un rateo di dose assorbita di 40 nGy h<sup>-1</sup> s.l.m. da cosmici all'aperto e 32 nGy h<sup>-1</sup> al chiuso per le strutture edilizie che mediamente introducono un'attenuazione di un fattore 0.8 [4].

Per i viaggi in aereo ad una quota rappresentativa di 8 km [5] si ha un rateo di dose equivalente pari a 2.8 µSv h<sup>-1</sup>.

<i>Luogo</i>	<i>Popolazione (milioni)</i>	<i>Altitudine (m)</i>	<i>Dose equivalente annuale (µSv)</i>		
			<i>Ionizzante</i>	<i>Neutroni</i>	<i>Totale</i>
<b><i>Città in altitudine</i></b>					
La Paz, Bolivia	1.0	3900	1120	900	2020
Lhasa, Cina	0.3	3600	970	740	1710
Quito, Ecuador	11.0	2840	690	440	1130
Mexico City, Messico	17.3	2240	530	290	820
Nairobi, Kenia	1.2	1660	410	170	580
Denver, USA	1.6	1610	400	170	570
Teheran, Iran	7.5	1180	330	110	440
<b><i>Livello del mare</i></b>			240	30	270
<b><i>Media mondiale</i></b>			300	80	380

**Tabella 2** - Esposizione media annua ai raggi cosmici in alcune città poste a differenti altitudini

Un numero limitato di aerei supersonici possono operare alla quota di 15 km con ratei di dose equivalente di oltre 10 µSv h<sup>-1</sup>.

## 1.2. Nuclidi cosmogenici

L'interazione dei raggi cosmici con l'atmosfera, la biosfera e la litosfera porta alla formazione di numerosi radioisotopi; in Appendice 2 sono riportate le loro caratteristiche. I più rilevanti sono <sup>3</sup>H, <sup>7</sup>Be, <sup>14</sup>C e <sup>22</sup>Na che peraltro inducono un irraggiamento interno di scarsa entità dovuto per lo più al <sup>14</sup>C (vedi tabella 3).

<i>Radionuclide</i>	<i>Introduzione (Bq y<sup>-1</sup>)</i>	<i>Dose equivalente annua (µSv y<sup>-1</sup>)</i>
<sup>3</sup> H	500	0.01
<sup>7</sup> Be	1000	0.03
<sup>14</sup> C	20000	12
<sup>22</sup> Na	50	0.15

**Tabella 3** - Introduzione annua da ingestione di radionuclidi cosmogenici e dosi equivalenti per gli adulti

## 1.3. Radiazione terrestre

Nei materiali terrestri esistono nuclidi con tempo di dimezzamento comparabile con quello dell'età della terra. In termini di dose, i principali radionuclidi primordiali sono il <sup>40</sup>K

( $T = 1.28 \times 10^9$  y), il  $^{232}\text{Th}$  ( $T = 1.41 \times 10^{10}$  y) e l' $^{238}\text{U}$  ( $T = 4.47 \times 10^9$  y). Di importanza secondaria sono il  $^{87}\text{Rb}$  ( $T = 4.7 \times 10^{10}$  y) e l' $^{235}\text{U}$  ( $T = 7.04 \times 10^8$  y).

Sia il  $^{40}\text{K}$  che il  $^{87}\text{Rb}$  decadono  $\beta^-$  in specie stabili. Nella tabella 4 sono date le loro caratteristiche. Il più importante è il  $^{40}\text{K}$  che è presente anche nel corpo umano.

Nuclide	Abbondanza		T	Radiazioni	Energia (MeV)	Intensità (%)
	Elementare (%)	Litosfera ( $\text{mg g}^{-1}$ )				
$^{40}\text{K}$	0.0118	3	$1.28 \times 10^9$ y	$e_{A1}$	0.00024	$\approx 16$
				$e_{A2}$	0.00296	7.0
				$\beta^-$	1.314	89.3
				X	0.00300	1.1
				$\gamma$	1.4608	10.7
$^{87}\text{Rb}$	27.85	75	$4.7 \times 10^{10}$ y	$\beta^-$	0.274	100

**Tabella 4** - Radionuclidi primordiali

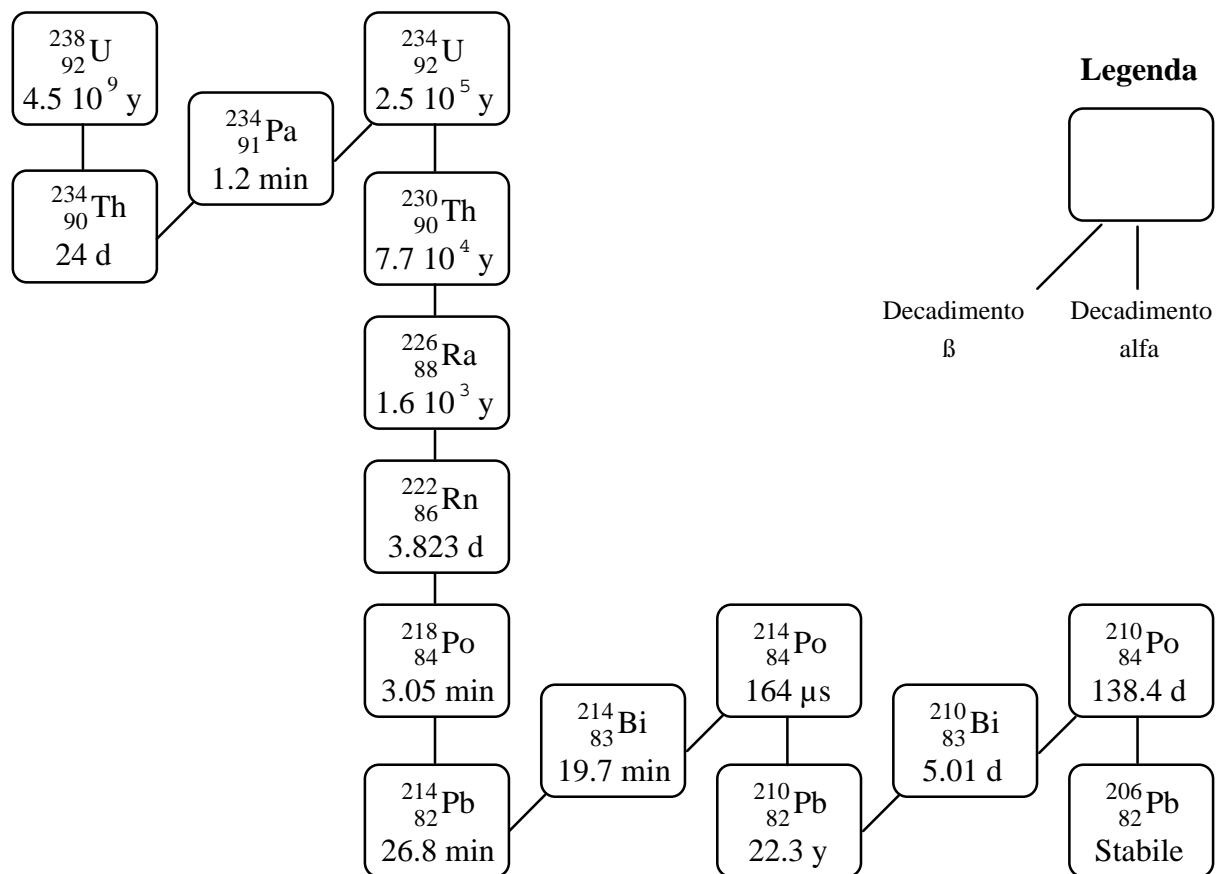
Molti radioisotopi naturali sono raggruppati nelle tre famiglie dell'uranio (figura 2), dell'attinio e del torio (figura 3) con capostipiti rispettivamente  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ ; i numeri di massa dei nuclidi di ciascuna famiglia sono ottenibili rispettivamente con le relazioni  $4n+2$  (con  $n = 59 \dots 51$ ),  $4n+3$  (con  $n = 58 \dots 51$ ) e  $4n$  (con  $n = 58 \dots 52$ ). La famiglia del nettunio,  $4n+1$  (con  $n = 61 \dots 52$ ), è stata scoperta con la radioattività artificiale; il capostipite è il  $^{245}_{96}\text{Cm}$  che ha  $T = 8.5 \times 10^3$  y.

In ognuna di esse compare un radioisotopo del radon (Rn) di cui ci occuperemo nel capitolo 3. Le tabelle 5 e 6 danno le principali caratteristiche dei radioisotopi del radon e dei suoi discendenti. Si noti che le energie  $\alpha$  indicate per il  $^{212}\text{Bi}$  (tabella 6) si riferiscono al decadimento alternativo (36%) verso il  $^{208}\text{Tl}$ .

L'irraggiamento interno ed esterno è causato pressochè esclusivamente dai radionuclidi delle famiglie dell'uranio e del torio presenti nei minerali naturali e quindi nei materiali da costruzione.

Per la famiglia dell' $^{238}\text{U}$  la concentrazione di attività ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ) è espressa in termini di  $^{226}\text{Ra}$ . Nei materiali usati in edilizia si hanno normalmente  $10 \div 100 \text{ Bq kg}^{-1}$  di  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{232}\text{Th}$  con picchi fino a qualche migliaio come per lo *scisto di allume* (Svezia), le *scorie di silicato di calcio* (USA) e i *residui di miniere di Uranio* (USA). Il  $^{40}\text{K}$  ha concentrazioni di attività per lo più da qualche centinaio ad oltre il migliaio di  $\text{Bq kg}^{-1}$ .

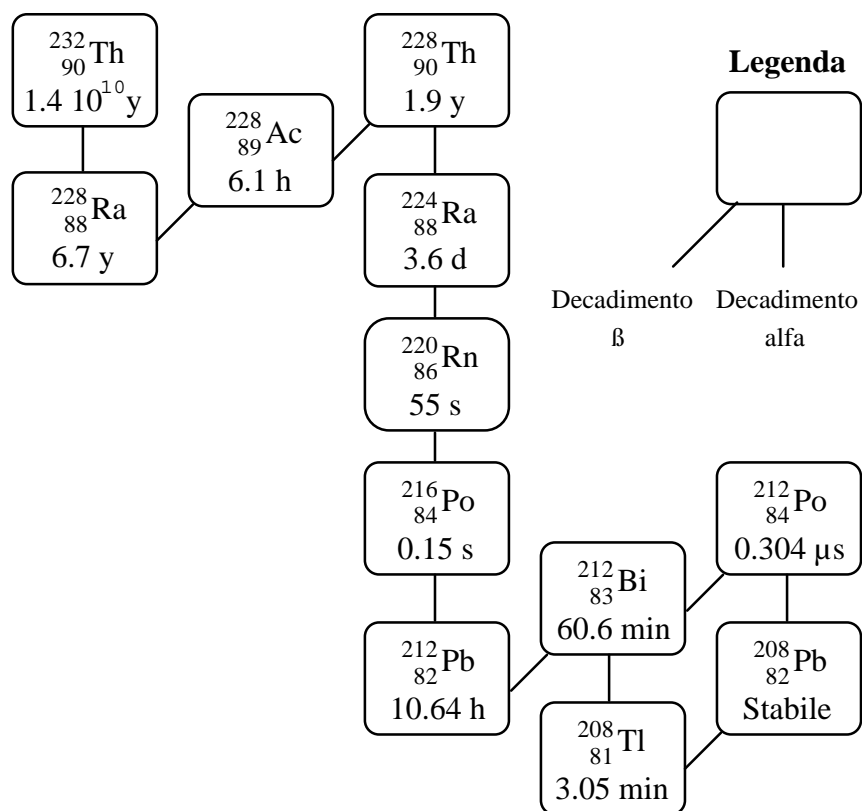
Il tufo è caratterizzato da concentrazioni di  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{232}\text{Th}$  di  $100 \div 300 \text{ Bq kg}^{-1}$  e di circa  $1500 \text{ Bq kg}^{-1}$  di  $^{40}\text{K}$ .



**Figura 2** - Famiglia dell'uranio

Radionuclide	Nome storico	T	Principali energie emesse (MeV)		
			Alfa	Beta	Gamma
<sup>222</sup> Rn	radon	3.823 d	5.49		
<sup>218</sup> Po	radium A	3.05 min	6.00		
<sup>214</sup> Pb	radium B	26.8 min		0.67	0.242 (8%)
				0.73	0.295 (19%)
				1.02	0.352 (37%)
<sup>214</sup> Bi	radium C	19.7 min		1.0	0.609 (46%)
				1.51	1.12 (15%)
				3.26	1.764 (16%)
<sup>214</sup> Po	radium C'	164 μs	7.69		
<sup>210</sup> Pb	radium D	22.3 y		0.015	0.047 (4%)
				0.061	
<sup>210</sup> Bi	radium E	5.01 d		1.161	
<sup>210</sup> Po	radium F	138.4 d	5.305		
<sup>206</sup> Pb	radium G	Stabile			

**Tabella 5** - Principali caratteristiche del <sup>222</sup>Rn e dei suoi discendenti



**Figura 3** - Famiglia del torio

Radionuclide	Nome storico	T	Principali energie emesse (MeV)		
			Alfa	Beta	Gamma
$^{220}\text{Rn}$	thoron	55 s	6.29		
$^{216}\text{Po}$	thorium A	0.15 s	6.78		
$^{212}\text{Pb}$	thorium B	10.64 h		0.331 0.569	0.239 (45%) 0.300 (3%)
$^{212}\text{Bi}$	thorium C	60.6 min	6.05 6.09	1.55 2.26	0.040 (1%) 0.727 (12%) 1.620 (3%)
$^{212}\text{Po}$	thorium C'	304 ns	8.78		
$^{208}\text{Tl}$	thorium C''	3.05 min		1.28 1.52 1.80	0.511 (22%) 0.583 (86%) 0.860 (12%) 2.614 (100%)
$^{208}\text{Pb}$	thorium D	Stabile			

**Tabella 6** - Principali caratteristiche del  $^{220}\text{Rn}$  e dei suoi discendenti



### 1.3.1. Irraggiamento esterno

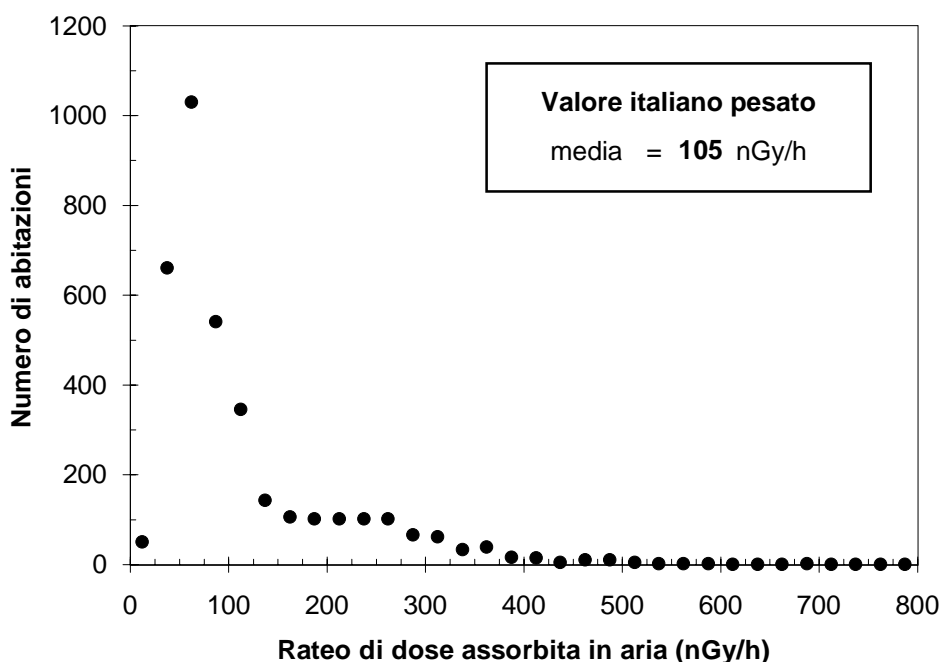
L'esposizione ai raggi gamma da radionuclidi naturali presenti nel suolo e nei materiali da costruzione avviene sia all'aperto (outdoors) che all'interno di edifici (indoors). La dose media outdoors pesata sulla popolazione mondiale è valutata in  $57 \text{ nGy h}^{-1}$ ; tale dato coincide con il valore medio italiano; il rateo di dose outdoor per irraggiamento esterno è pertanto di  $97 \text{ nGy h}^{-1}$  se si tiene conto anche della radiazione cosmica ( $40 \text{ nGy h}^{-1}$ ).

In alcune zone del mondo si hanno valori anche molto più alti come nei Delta del Nilo ( $20 \div 400 \text{ nGy h}^{-1}$ ) e del Gange ( $260 \div 440 \text{ nGy h}^{-1}$ ). In un'area ricca di carbonati al torio nei pressi di Mombasa (Kenia) si sono rilevati ratei di dose fino a  $12000 \text{ nGy h}^{-1}$  mentre a Ramsar (Iran) si arriva fino a  $30000 \text{ nGy h}^{-1}$  ed in prossimità di aree ricche di rocce uranifere in Svezia si raggiungono i  $100000 \text{ nGy h}^{-1}$ .

Il rateo di dose medio in aria all'interno di edifici derivante dai raggi gamma prodotti dal decadimento di radionuclidi naturali, pesato sulla popolazione mondiale, si aggira intorno a  $80 \text{ nGy h}^{-1}$ .

Nel comparare i valori medi indoor e outdoor si è riscontrato che l'effetto globale dei materiali da costruzione che ci circondano è quello di incrementare il rateo di dose: il rapporto indoor - outdoor tra i ratei di dose assorbita in aria è compreso tra 1 e 2 con un incremento medio della dose indoor di circa il 50%.

Nell'indagine nazionale sulla radioattività naturale nelle abitazioni condotta da ISS e ANPA [4] si è determinato il rateo di dose assorbita in aria indoor per radiazione gamma di origine terrestre (suolo e materiali edilizi) ottenendo i risultati in figura 4 [4]. La media italiana risulta pari a  $105 \text{ nGy h}^{-1}$ ; il rateo di dose indoor per irraggiamento esterno è pertanto di  $137 \text{ nGy h}^{-1}$  se si tiene conto anche della radiazione cosmica ( $32 \text{ nGy h}^{-1}$ ).



**Figura 4** - Distribuzione del rateo di dose assorbita in aria dovuta alla radiazione gamma nel campione di abitazioni (il contributo della radiazione cosmica è stato sottratto ai valori misurati). Il valore medio italiano riportato nel riquadro è stato ottenuto dai valori medi di ogni regione pesati sulla base del numero di famiglie residenti

Nel rapporto UNSCEAR 1988 fu usato il coefficiente  $0.7 \text{ Sv Gy}^{-1}$  per convertire la dose assorbita in aria a dose equivalente. Questo si riferisce ad adulti<sup>1</sup> per l'esposizione ambientale a raggi gamma emessi da radionuclidi naturali presenti nelle rocce.

Sulla base di tale coefficiente di conversione e assumendo un fattore di occupazione indoor pari a 0.8 [4] è possibile combinare le esposizioni outdoor ( $57 \text{ nGy h}^{-1}$ ) e indoor ( $105 \text{ nGy h}^{-1}$ ) per stimare in circa  $0.58 \text{ mSv y}^{-1}$  la dose equivalente media in Italia<sup>2</sup> dovuta ad irraggiamento esterno da raggi gamma emessi da radionuclidi naturali (il valor medio mondiale è  $0.46 \text{ mSv y}^{-1}$  [1]).

Per neonati e bambini tali valori vanno maggiorati del 30% e del 10% rispettivamente.

### 1.3.2. Irraggiamento interno

Dose al corpo umano da radionuclidi naturali a lunga vita media proviene da inalazione ed ingestione. Il radon sarà considerato più avanti nel capitolo 3.

Il contenuto di potassio nel corpo umano è valutato approssimativamente intorno allo 0.18% in peso e l'abbondanza isotopica del  $^{40}\text{K}$  è  $1.18 \times 10^{-4}$ . Con un'attività specifica media di  $55 \text{ Bq per Kg}$  di peso corporeo ed un coefficiente di conversione approssimato a  $3 \mu\text{Sv y}^{-1}$  per  $\text{Bq Kg}^{-1}$ , la dose equivalente annua da  $^{40}\text{K}$  nel corpo vale  $165 \mu\text{Sv}$  per adulti, in maggioranza rilasciata da particelle beta. Il valore per i bambini è di  $185 \mu\text{Sv}$ .

Radionuclidi delle serie dell'uranio e del torio vengono introdotti nell'organismo perchè presenti nei cibi, nell'acqua e nell'aria.

Per l'ingestione i radionuclidi dominanti sono il  $^{210}\text{Pb}$  ed il  $^{210}\text{Po}$ .

Per l'inalazione (escludendo il radon ed i suoi figli a breve T) il radionuclide dominante è il  $^{210}\text{Pb}$ . Si può notare che fumare 10 sigarette al giorno raddoppia l'introduzione di  $^{210}\text{Po}$ .

I radionuclidi della serie dell'uranio e del torio danno in media dosi equivalenti impegnate annue pari a  $62 \mu\text{Sv y}^{-1}$ , sempre non considerando il contributo del radon che verrà esaminato a parte.

La notevole variabilità delle concentrazioni di attività nei cibi può portare al superamento dei valori di riferimento anche di ordini di grandezza. Ad esempio si riscontrano elevati livelli di  $^{210}\text{Po}$  in '*yerba maté*', una pianta utilizzata in una bevanda sudamericana.

Per importanza radiologica, comunque, il maggior incremento rispetto ai livelli di riferimento si riscontra nelle regioni artiche e sub-artiche, dove il  $^{210}\text{Pb}$  e il  $^{210}\text{Po}$  si accumulano nella carne di renna e caribù che costituiscono una parte importante nella dieta degli abitanti di quelle regioni.

In definitiva, per introduzione di radionuclidi naturali, la dose equivalente impegnata in media in un anno nel mondo in aria, cibo e acqua è stimata in  $0.23 \text{ mSv}$ , di cui  $0.17 \text{ mSv}$  derivano dal  $^{40}\text{K}$  e  $0.06 \text{ mSv}$  da radionuclidi delle serie dell'uranio e del torio.

---

<sup>1</sup>Per tale coefficiente si assume un valore pari a  $0.8 \text{ Sv/Gy}$  per i bambini e  $0.9 \text{ Sv/Gy}$  per gli infanti [4].

<sup>2</sup> $\text{H}_E = 57 \text{ nGy h}^{-1} \times 0.7 \text{ nSv nGy}^{-1} \times 8760 \text{ h y}^{-1} \times 0.2 + 105 \text{ nGy h}^{-1} \times 0.7 \text{ nSv nGy}^{-1} \times 8760 \text{ h y}^{-1} \times 0.8 = 0.58 \text{ mSv y}^{-1}$

## 2. Incremento della radiazione di fondo per i contributi dovuti a pratiche umane

Recentemente la tecnologia nucleare è stata impiegata dall'uomo in moltissimi campi, dalla medicina alle armi, dalla produzione di energia alla rivelazione degli incendi, dagli orologi luminescenti alla ricerca dei minerali; questo ha ovviamente portato ad un incremento della dose ricevuta sia dai singoli individui sia dalla umanità presa nel suo insieme.

Le dosi individuali derivanti dalle sorgenti di radiazioni artificiali variano in misura notevole ma, in genere, sono molto minori di quelle derivanti da radiazioni di origine naturale.

### 2.1. Sorgenti e radiazioni in campo medico

Attualmente gli usi medici costituiscono la maggior fonte di esposizione dell'uomo alle radiazioni artificiali ed in molti paesi sono responsabili della quasi totalità della dose derivante da sorgenti artificiali [6].

In medicina le radiazioni sono usate largamente per diagnosi con raggi X, per diagnosi con somministrazione di radioisotopi (medicina nucleare) e per terapia nel trattamento del cancro e di altre malattie [7].

I dati più completi sulla frequenza degli esami radiologici e le dosi assorbite a seguito di esposizioni mediche provengono dai paesi economicamente più sviluppati, nei quali vive meno di un quarto di tutta la popolazione del mondo. Per il resto della popolazione si hanno informazioni frammentarie. L'ONU ha individuato quattro livelli sanitari con prestazioni decrescenti. Il I° livello è attribuito ai paesi sviluppati.

La disponibilità di servizi di diagnosi radiologica su scala mondiale è molto disuniforme: in molti paesi un apparecchio radiologico viene utilizzato da meno di 2000 persone, in altri il numero dei pazienti serviti oscilla tra 100000 e 600000. Anche il numero di esami radiologici per persona è molto variabile: si va dai 15 ÷ 20 esami per 1000 persone per anno ai 1000 ÷ 2000 esami di altri. Su una popolazione mondiale dell'ordine di 5 miliardi di persone, qualcuno calcola che più dei tre quarti non ha la possibilità di ricevere alcun esame radiologico, indipendentemente dal tipo di malattia da cui è affetto.

La stima ONU della dose equivalente individuale annua, mediata sulla popolazione mondiale, è di circa 0,3 mSv e di 1 mSv per la popolazione dei paesi sviluppati (tabella 7).

A livello mondiale, la dose equivalente collettiva viene stimata in circa  $1.6 \times 10^6$  Sv-uomo: il 90% è attribuibile ad esami diagnostici con raggi X ed il 10% alla medicina nucleare.

<i>Livello sanitario</i>	<i>Popolazione (milioni)</i>	<i>Dose equivalente annua per persona (mSv) da diagnostica</i>		<i>Dose equivalente collettiva annua (<math>10^3</math> Sv-uomo) da diagnostica</i>	
		<i>medica</i>	<i>dentale</i>	<i>medica</i>	<i>dentale</i>
I	1350	1	0.01	1300	14
II	2630	0.1	0.001	290	3
III	850	0.04	0.0003	40	0.3
IV	460	0.04	0.0003	20	0.1
<i>Totale</i>	5290	-	-	1600	17
<i>Media</i>	-	0.3	0.003	-	-

**Tabella 7** - Dosi equivalenti stimate per la popolazione mondiale da esami diagnostici medici e dentali

Con 1 mSv y<sup>-1</sup> pro capite in Italia si ha una dose equivalente collettiva annua di circa 6×10<sup>4</sup> Sv-uomo. Adottando il fattore di rischio di 5×10<sup>-2</sup> Sv<sup>-1</sup> [8] per insorgenza di tumori mortali nella popolazione, l'irraggiamento medico annuo può portare a 6×10<sup>4</sup> × 5×10<sup>-2</sup> ≅ 3000 tumori mortali annui.

Si noti che alle radiografie dentarie è attribuita nei paesi sviluppati (livello sanitario I) una dose equivalente di 0.03 mSv per esame, a fronte di una dose equivalente media annua per persona di 0.01 mSv.

<i>Esame / sito</i>	<i>Numero di esami per 1000 persone</i>	<i>Dose equivalente per esame (mSv)</i>	<i>Dose equivalente collettiva annua (Sv-uomo)</i>
Radiografia del torace	171	0.14	31500
Schermografia del torace	260	0.52	182000
Fluoroscopia del torace	33	0.98	43100
Estremità	121	0.06	10600
Colonna vertebrale lombo sacrale	54	1.7	122000
Pelvi	21	1.2	32800
Anca / Femore	12	0.92	15300
Cranio	40	0.16	8560
Addome	32	1.1	44700
Tratto gastro intestinale superiore	52	4.1	285000
Tratto gastro intestinale inferiore	11	7.2	112000
Colecistografia	9	1.5	18100
Urografia	14	3.1	58200
Angiografia	6	6.8	57300
Mammografia	12	1.0	17000
Tomografia Computerizzata	39	4.3	224000
<b>Totale</b>	<b>887</b>	<b>-</b>	<b>1262000</b>
<b>Media per esame (mSv)</b>	<b>-</b>	<b>1.05</b>	<b>-</b>
<b>Dose equivalente per persona</b>	<b>-</b>	<b>0.93</b>	<b>-</b>

**Tabella 8** - Dose collettiva mondiale da esami a raggi X per diagnosi in paesi di livello sanitario I

<i>Esame / sito</i>	<i>Contributo alla dose collettiva totale (%)</i>	<i>Esame / sito</i>	<i>Contributo alla dose collettiva totale (%)</i>
Tratto gastro intestinale superiore	23	Addome	4
Tomografia computerizzata	18	Pelvi	3
Schermografia del torace	14	Radiografia del torace	2
Fluoroscopia del torace	3	Anca / Femore	1
Colonna vertebrale lombo sacrale	10	Colecistografia	1
Tratto gastro intestinale inferiore	9	Mammografia	1
Urografia	5	Estremità	0.8
Angiografia	5	Cranio	0.7

**Tabella 9** - Contributo di differenti tipi di esami diagnostici alla dose collettiva in paesi di livello sanitario I

<i>Organo</i>	<i>Radio farmaco</i>	<i>Fattore di dose (mSv/MBq)</i>	<i>Attività media (MBq)</i>	<i>Dose equivalente per esame (mSv)</i>	<i>Numero di esami ogni 1000 persone</i>	<i>Dose equivalente per persona (μSv)</i>
Ossa	<sup>99m</sup> Tc phosphate	0.008	790	6.3	6.39	40.3
Cervello	<sup>99m</sup> Tc gluconate	0.009	962	8.7	4.47	38.7
Cardiovascolare	<sup>201</sup> Tl chloride	0.23	76	17.5	0.79	13.8
	<sup>99m</sup> Tc erythrocytes	0.0085	1156	9.8	1.19	11.7
Fegato / milza	<sup>99m</sup> Tc colloid	0.014	117	1.6	4.81	7.9
	<sup>99m</sup> Tc HIDA	0.024	226	5.4	0.16	0.9
Polmoni	<sup>99m</sup> Tc MMA	0.012	114	1.4	1.83	2.5
Reni	<sup>99m</sup> Tc gluconate	0.009	523	4.7	0.75	3.5
Tiroide	<sup>99m</sup> Tc pertechnetate	0.015	250	3.8	1.12	4.5
	<sup>131</sup> I ionic	6.6	0.38	2.5	1.36	3.4
<i>Totale</i>					23.6	127.2

**Tabella 10** - Dosi equivalenti per pazienti adulti sottoposti ad esami di medicina nucleare diagnostica. Valori orientativi tratti da un'indagine condotta in Canada [1]

## 2.2. Produzione di energia

L'estrazione e la combustione del carbone accrescono la concentrazione ambientale di radionuclidi naturali. La quantità di radionuclidi immessa nell'ambiente dipende dalla concentrazione di sostanze radioattive nel carbone (che può variare di un fattore cento da giacimento a giacimento) e nelle ceneri (la maggior parte delle sostanze radioattive si concentra nella cenere), dalla temperatura di combustione, dalla ripartizione fra le ceneri pesanti depositate sul fondo della fornace e le ceneri volatili e dall'efficienza dei dispositivi di controllo delle emissioni. Le dosi equivalenti collettive per GWa di energia elettrica generata vanno da 0.5 a 6 Sv-uomo a seconda del tipo di impianto con eccezione degli impianti cinesi che, per la loro tipologia e per l'attività dei radionuclidi presenti nel carbone, arrivano a dare 50 Sv-uomo GWa<sup>-1</sup> per rilascio di radionuclidi in atmosfera. Questo porta a un valor medio mondiale di 20 Sv-uomo GWa<sup>-1</sup> [1].

L'energia geotermica è un'altra sorgente di esposizione alle radiazioni: molti paesi utilizzano le riserve di vapore e di acqua calda sotterranee per generare elettricità o per riscaldare gli edifici. Sebbene la sua incidenza sul consumo di energia elettrica sia piccola, si prevede che la sua importanza relativa cresca. La dose equivalente collettiva è stimata in 2 Sv-uomo GWa<sup>-1</sup>.

La torba viene bruciata per produrre energia in particolare nei paesi nordici. Le acque di superficie e sotterranee fluendo portano i radionuclidi naturali nei depositi di torba dove vengono assorbiti. La dose equivalente collettiva è stimata in 2 Sv-uomo GWa<sup>-1</sup> [1].

<i>Sorgente</i>	<i>Dose equivalente collettiva normalizzata [Sv-uomo GWa<sup>-1</sup>]</i>
Carbone	20
Petrolio	0.5
Gas naturale	0.03
Energia geotermica	2
Torba	2

**Tabella 11** - Stime di dose equivalente collettiva per unità di energia elettrica di origine non nucleare

### 2.3. Produzione di energia elettronucleare

La produzione di energia elettrica in centrali nucleari ha continuato a crescere sin dall'entrata in esercizio della prima centrale nel 1956; oggi tuttavia tale rateo di incremento è inferiore a quello tipico di altri mezzi di produzione di energia.

Le centrali elettronucleari fanno parte del ciclo di produzione del combustibile nucleare, che inizia con l'estrazione e la lavorazione dell'uranio grezzo e continua con la produzione del combustibile stesso. Dopo l'utilizzazione nelle centrali elettriche, il combustibile irraggiato viene talvolta riprocessato per recuperare l'uranio ed il plutonio; il ciclo poi terminerà con l'eliminazione delle scorie.

Sia le miniere che gli impianti di lavorazione del minerale immettono materiali radioattivi naturali nell'ambiente. Le miniere sono responsabili del maggior contributo alla dose assorbita nel breve termine, gli impianti di lavorazione sono invece responsabili delle dosi assorbite nel lungo termine: essi producono rifiuti che contengono radionuclidi naturali che restano attivi per milioni di anni dopo la lavorazione e danno il maggior contributo all'impegno di dose equivalente collettivo, soprattutto per la emanazione di radon.

L'uranio, dopo aver lasciato gli impianti di lavorazione, viene trasformato in combustibile attraverso ulteriori processi che danno origine sia a scarichi aeriformi che a scarichi liquidi, ma le dosi relative sono molto più piccole di quelle associate agli altri stadi del ciclo del combustibile.

A questo punto il combustibile è pronto per essere impiegato nelle centrali.

Le quantità dei diversi materiali radioattivi rilasciati da reattori variano notevolmente, non solo da filiera a filiera, ma anche fra i vari progetti appartenenti alla stessa filiera, addirittura tra reattori basati sullo stesso progetto. Queste quantità variano anche di anno in anno per lo stesso reattore, soprattutto perchè il lavoro di manutenzione (che dà luogo al maggior contributo per gli scarichi di routine) varia ogni anno.

Dopo essere stato utilizzato nelle centrali, meno di un decimo del combustibile irraggiato su scala mondiale viene riprocessato per estrarre l'uranio ed il plutonio in vista di un loro riutilizzo. Il resto costituisce rifiuti ad alta attività che finora sono stati stoccati in depositi temporanei. Sono in corso ricerche sui metodi di solidificazione e sulle modalità di collocamento in formazioni geologiche stabili sulla terra o sul fondo marino. Nel futuro, una volta effettuato il collocamento, si ritiene che la radioattività dei rifiuti non potrà raggiungere l'uomo [6].

L'impegno di dose collettivo per unità di energia generata è stato stimato con l'ausilio di modelli ambientali generalizzati [5]. Sono state fatte stime separate per le componenti normalizzate risultanti da esposizioni locali e regionali e da esposizioni a radionuclidi globalmente dispersi. I principali contributi sono mostrati in tabella 12.

<i>Sorgente</i>	<i>Impegno di dose collettivo per unità di energia generata [Sv-uomo GWa<sup>-1</sup>]</i>
<b>Componente locale e regionale a breve termine (1 + 2 anni)</b>	
Industria mineraria e di lavorazione del minerale	1.5
Fabbricazione del combustibile	0.003
Operazione del reattore	1.3
Riprocessamento	0.25
Trasporto	0.1
Totale (arrotondato)	3
<b>Componente globale a lungo termine (integrata su 10000 anni)</b>	
Estrazione e lavorazione del minerale (rilasci di radon in 10000 anni)	150
Confinamento geologico dei rifiuti del reattore	0.5
Radionuclidi globalmente dispersi (principalmente dal riprocessamento e dal confinamento geologico di rifiuti solidi)	50
Totale (arrotondato)	200

**Tabella 12** - Impegno di dosi collettive derivanti dalla produzione di energia nucleare

Nel caso italiano ove non c'è stata estrazione né lavorazione di uranio la stima della componente locale e regionale a breve termine può essere valutata in circa 1.5 Sv-uomo GWa<sup>-1</sup>, ovvero in 0.03 µSv GWa<sup>-1</sup> assumendo una popolazione italiana di  $5 \times 10^7$  abitanti.

Gli impegni di dose collettivi sono stati troncati ai 10000 anni a causa delle grandi incertezze nel fare previsioni su lunghissimi periodi.

Il 90% della dose a breve termine è assorbita entro un anno dallo scarico o rilascio dei materiali radioattivi quasi completamente dalle popolazioni del luogo e della regione circostante.

La componente a breve termine della dose collettiva annua associata al ciclo del combustibile nucleare ammonta, per la produzione di 212 GWa (anno 1989), a circa 850 Sv-uomo [5]; questo valore, diviso per la popolazione mondiale di 5.3 miliardi di persone, porta ad una stima media della dose individuale annua di circa 0.15 µSv che corrisponde allo 0.01% delle dosi da sorgenti naturali. [9]

In base alla stima di 200 Sv-uomo GWa<sup>-1</sup> riportata in tabella 12, si valuta in 400000 Sv-uomo l'impegno di dose collettivo per i prossimi 10000 anni dalla produzione totale annua (2000 GWa) di energia nucleare (si ricorda che il fondo naturale annuo è di  $1.3 \times 10^7$  Sv-uomo). Per le principali filiere di impianti nucleari, le dosi annue ai membri più esposti del pubblico variano da 1 a 20 µSv. Le stime per vasti impianti di riprocessamento del combustibile sono comprese tra i 200 e i 500 µSv y<sup>-1</sup>.

## **2.4. Ricadute radioattive da esplosioni nucleari (Fall-Out)**

Col termine ricadute radioattive si indicano i frammenti che si depositano sulla superficie terrestre a seguito di esplosioni nucleari e che quindi costituiscono una potenziale sorgente di esposizione per l'uomo.

È noto che a causa dell'elevata quantità di calore prodotto nell'esplosione nucleare, la materia che si trova nelle vicinanze viene rapidamente vaporizzata, andando a formare un insieme di frammenti che includono i prodotti di fissione, il combustibile nucleare non esploso, le parti che costituivano il contenitore della bomba e tutte quelle sostanze che si trovano nei dintorni dell'esplosione. Esse vengono catturate quindi dalla sfera di fuoco che si espande e si innalza molto rapidamente. Non appena comincia a raffreddarsi però si

manifestano fenomeni di condensazione che portano alla formazione di una nuvola a forma di fungo che contiene particelle solide e goccioline di acqua. La nuvola sale fino ad un'altezza che è funzione della potenza della bomba e della situazione meteorologica della zona. Per bombe dell'ordine del megatone (un megatone corrisponde all'energia rilasciata da  $10^6$  tonnellate di TNT) la nube può raggiungere un'altezza di circa 40 Km.

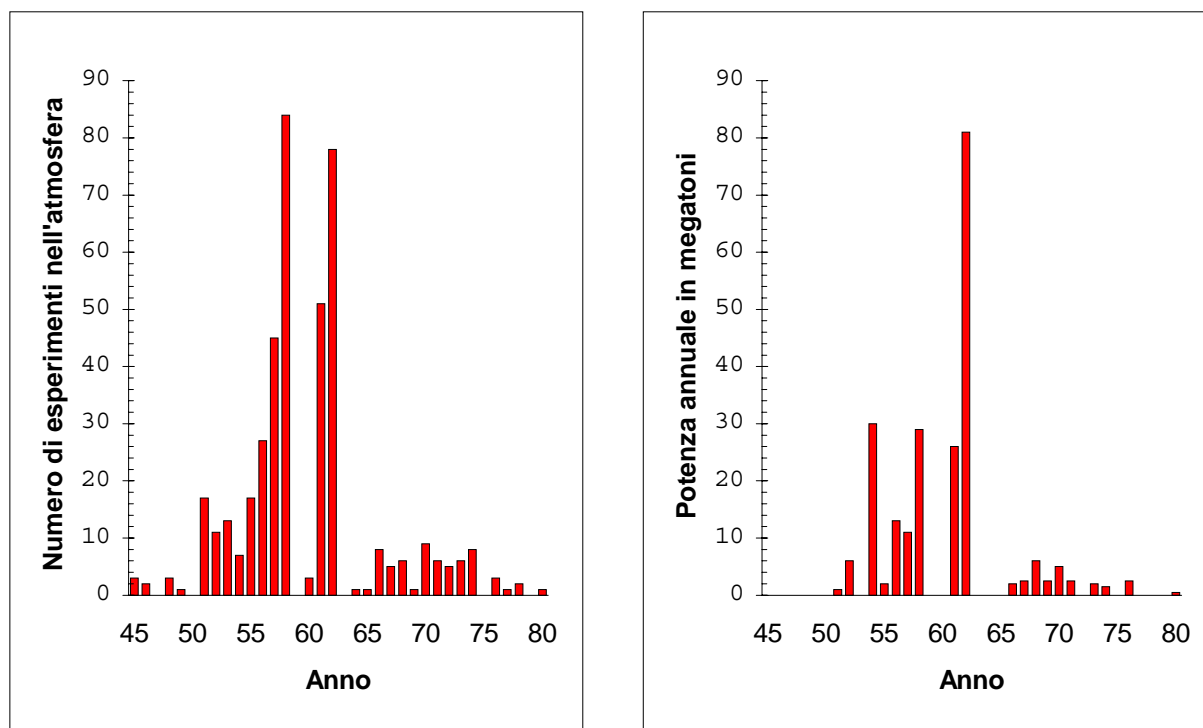
La ricaduta radioattiva viene distinta in locale e generale.

La parte dei frammenti che costituisce la ricaduta locale varia da zero (nel caso di esplosione a grande altezza dal suolo) a circa un mezzo (nel caso di esplosione sulla superficie terrestre). Se la sfera di fuoco tocca la superficie della terra, una grande quantità di materiale è sollevato dal suolo in particelle di grandi dimensioni che tendono a ricadere abbastanza rapidamente. Se l'altezza dell'esplosione è tale che la sfera di fuoco non tocca il suolo, i frammenti vengono dispersi nell'atmosfera e tendono a discendere sulla superficie terrestre molto lentamente, venendo a costituire la ricaduta generale.

Il tempo di permanenza di questi frammenti nell'atmosfera è funzione della potenza della bomba. Per bombe dell'ordine del Kilotone i frammenti non vengono proiettati nella stratosfera, restano nella troposfera da dove, a causa delle precipitazioni, vengono trasportati a terra in un tempo variabile da un giorno ad un mese.

Se l'esplosione è dell'ordine del Megatone, i frammenti sono portati nella stratosfera, ad un'altitudine da 10 a 50 Km circa, e quindi, per l'assenza di fenomeni meteorologici, non vengono trasportati immediatamente verso il basso: possono impiegare un tempo superiore a cinque anni per ritornare a terra. Se i frammenti restano confinati nella parte più bassa della stratosfera, il tempo di dimezzamento, cioè il tempo impiegato affinché metà di essi sia rimossa dalla stratosfera, è all'incirca dell'ordine di un anno.

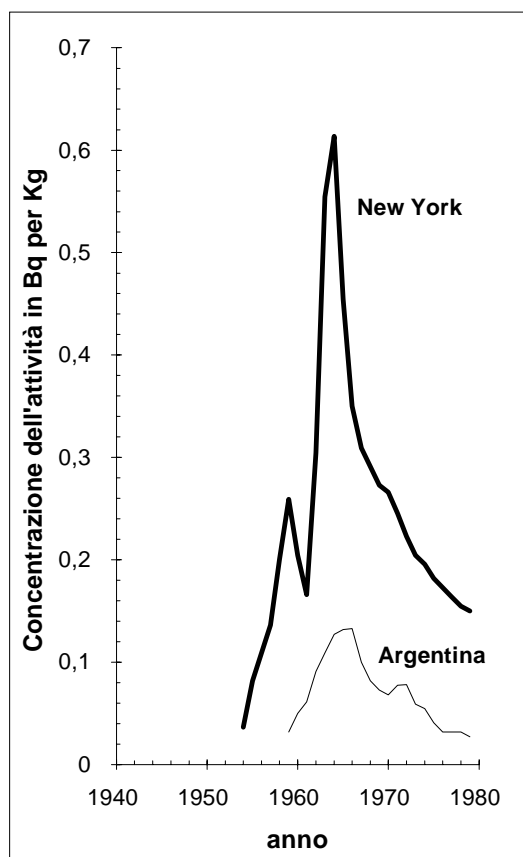
Si è ricorso ad esplosioni nucleari nell'atmosfera nella sperimentazione delle armi nucleari. Tale sperimentazione ha avuto due picchi: il primo, tra il 1952 ed il 1958, il secondo, più elevato, nel 1961 e nel 1962, per un totale di 520 esplosioni di fissione e fusione per 545 Megatoni (figura 5).



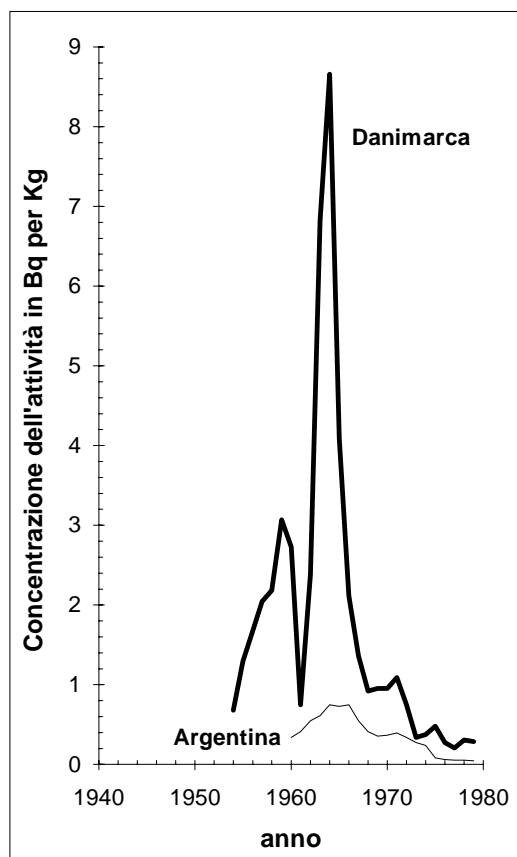
**Figura 5 -** Esplosioni nucleari nell'atmosfera



Gli effetti sulla dieta hanno avuto lo stesso andamento degli esperimenti, con picchi nel 1958 - 1960 e, soprattutto, nel 1963 - 1964 (figure 6 e 7) [6]. Si noti che fu coinvolto soprattutto l'emisfero nord in cui avvenne la gran parte degli esperimenti.



**Figura 6 -  $^{90}\text{Sr}$  nella dieta**



**Figura 7 -  $^{137}\text{Cs}$  nella dieta**

A seguito di un'esplosione nucleare si formano più di 200 tipi di prodotti di fissione; la maggior parte di essi si trovano nella ricaduta locale che, essendo confinata in un'area abbastanza piccola, ha un effetto trascurabile sulla popolazione nel suo insieme, purché sia stata operata una scelta opportuna del luogo dell'esplosione, delle condizioni del tempo e del tipo di esplosione. A causa del ritardo con cui si manifesta il fall-out generale, dei tempi di dimezzamento dei radioisotopi e delle modalità di trasferimento all'uomo, solo un limitato numero di prodotti di fissione ha importanza ai fini dei possibili effetti sull'uomo [3]. In definitiva essi sono  $^{131}\text{I}$ ,  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{95}\text{Zr}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , nonché il  $^{14}\text{C}$ , che si produce in seguito all'interazione dei neutroni con l'azoto dell'atmosfera.

Sia lo  $^{131}\text{I}$  che lo  $^{89}\text{Sr}$ , a causa della loro breve vita media, danno effetti solo in un piccolo periodo di tempo, mentre  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{14}\text{C}$  rimangono attivi per tempi molto più lunghi. Le dosi imputabili ai radionuclidi emessi nelle esplosioni nucleari vengono assorbite in tempi diversi: lo  $^{95}\text{Zr}$  ( $T = 64$  d) ha già fornito tutto il suo contributo di dose; il  $^{137}\text{Cs}$ , lo  $^{90}\text{Sr}$  ( $T \approx 30$  y) ed il  $^3\text{H}$  forniranno la maggior parte del loro contributo entro la fine del secolo; solo il  $^{14}\text{C}$  ( $T = 5730$  y) rimarrà attivo per lungo tempo, ma con contributi di scarso rilievo. La dose equivalente media annua è stimata in circa 0,01 mSv per individuo, ma l'impegno di dose equivalente collettivo è il più alto fra quelli provenienti dalle sorgenti prodotte dall'uomo: è stimato intorno ai 30 milioni di Sv-uomo [1]. Di questo, circa  $7 \times 10^6$  Sv-uomo saranno rilasciati entro l'anno 2200. Il resto, a causa della lunga vita media del  $^{14}\text{C}$ , sarà rilasciato nei

prossimi 10000 anni. L'impegno di dose fino al 2200 per i test in atmosfera si aggira intorno a 1.4 mSv; su tutto il tempo esso vale 3.7 mSv. Entrambe le determinazioni sono dello stesso ordine di grandezza della dose equivalente da esposizione a sorgenti naturali per un solo anno. Queste stime globali includono il contributo dovuto alle dosi assorbite dalla popolazione prossima ai siti usati per i test atmosferici. Sebbene tale contributo sia piccolo in termini globali, alcune dosi locali hanno raggiunto livelli significativi. Le dosi alla tiroide in bambini che abitavano in prossimità del luogo in cui sono avvenuti i test nel Nevada (U.S.A.) possono aver raggiunto l'intensità di 1 Gy. In simili, e forse maggiori, dosi alla tiroide si è incorso tra il 1949 e il 1962 ai confini del sito di Semipalatinsk (U.S.S.R.).

## **2.5. Esposizioni a seguito di incidenti**

I due incidenti più seri nella produzione di armi nucleari avvennero nel settembre 1957 a Kyshtym (U.S.S.R. - Urali del sud) e nell'impianto di Windscale (U.K. - Sellafield) nell'ottobre dello stesso anno.

A Kyshtym vi fu un'esplosione chimica a seguito di un malfunzionamento del sistema di refrigerazione di una vasca di immagazzinamento di scorie costituite da prodotti di fissione ad alta attività. I principali prodotti di fissione rilasciati furono gli isotopi di cerio, zirconio, niobio e stronzio. Le dosi derivarono dai prodotti di fissione depositati al suolo e dallo stronzio entrato nella catena alimentare. La dose collettiva fu equamente suddivisa tra gli individui che furono evacuati dall'area ad alta contaminazione (circa 10000 persone) e quelli che rimasero nelle aree meno contaminate (circa 260000 persone). La dose totale collettiva sui 30 anni fu stimata in circa 2500 Sv-uomo. Le dosi individuali maggiori furono assorbite dalla gente evacuata entro pochi giorni dall'incidente. La dose equivalente media per questo gruppo di 1150 persone fu di circa 500 mSv.

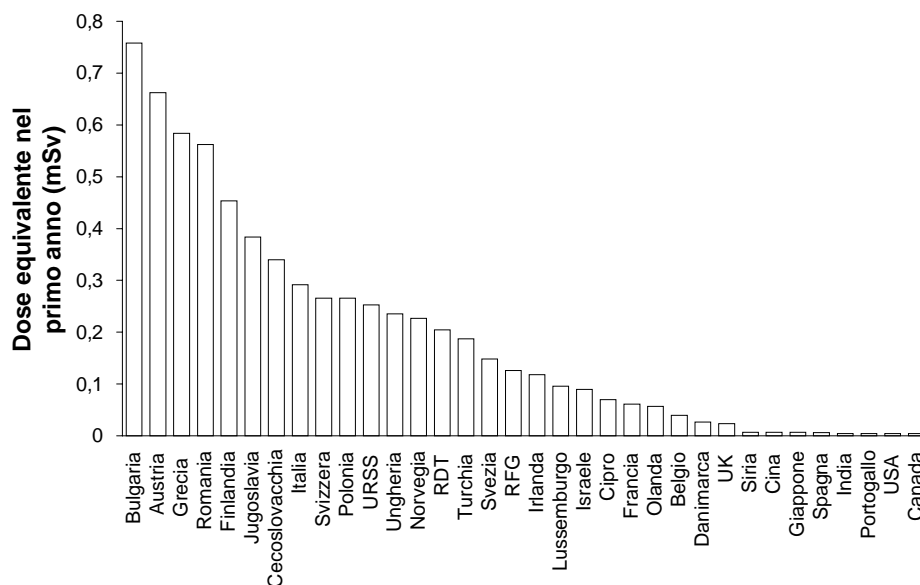
Nell'incidente di Windscale vi fu un incendio nel nocciolo di uranio naturale e grafite di un reattore raffreddato ad aria volto principalmente alla produzione militare di plutonio. I principali materiali rilasciati furono gli isotopi di xenon, iodio, cesio e polonio. L'ingestione di latte fu la più importante via di introduzione. La dose equivalente totale collettiva in Europa, includendo il Regno Unito, fu di circa 2000 Sv-uomo. Le dosi assorbite individuali più alte, fino ai 100 mGy, furono alla tiroide di bambini che vivevano in prossimità del sito.

Ci sono stati parecchi incidenti che hanno danneggiato reattori nucleari di potenza, fra i quali i più importanti furono gli incidenti di Three Mile Island (U.S.A.) e di Chernobyl (U.S.S.R.).

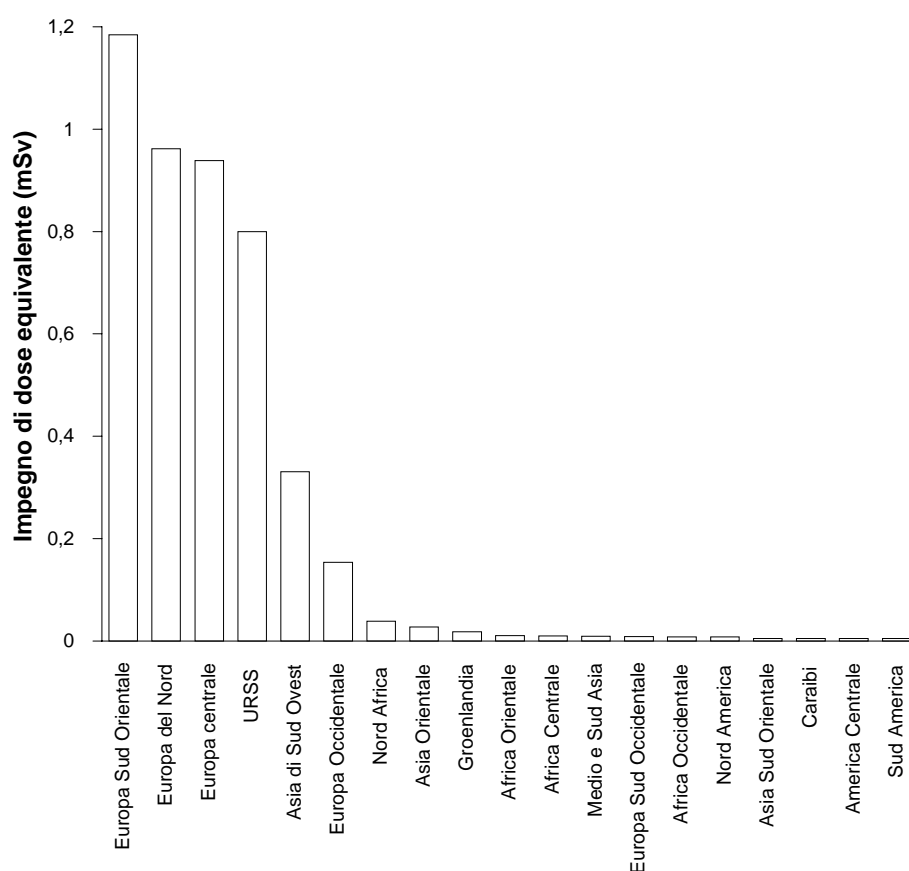
L'incidente di Three Mile Island causò un serio danneggiamento al nocciolo del reattore, ma quasi tutti i prodotti di fissione furono trattiene all'interno della struttura di contenimento. La dose equivalente collettiva risultante non fu superiore ai 40 Sv-uomo. Le dosi ai singoli individui del pubblico furono basse, il valor massimo non raggiunse il mSv.

L'incidente all'unità 4 della centrale nucleare di Chernobyl avvenne il 26 aprile 1986. L'esplosione con il successivo incendio della grafite rilasciarono una parte significativa del materiale costituente il nocciolo e causarono una contaminazione, principalmente in Unione Sovietica e in Europa. I rilasci iniziali di materiali radioattivi furono dispersi con i venti in direzione nord; i successivi rilasci si dispersero verso ovest e sud ovest ed anche in altre direzioni.  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  e  $^{137}\text{Cs}$  furono i più importanti radionuclidi che si depositarono dando luogo ad esposizione soprattutto per irraggiamento interno a seguito di ingestione di cibo contaminato. L'impegno di dose equivalente collettivo dall'incidente è stato stimato in 600000 Sv-uomo. Le dosi agli individui variarono molto: solo poche persone del gruppo evacuato ricevettero dosi equivalenti prossime a 0.5 Sv. La dose equivalente media annua nelle zone circostanti l'area di evacuazione sottoposte a rigido controllo si ridusse da 40 mSv nell'anno seguente quello dell'incidente a meno di 10 mSv in ognuno degli anni fino al 1989.

Nelle figure 8 e 9 sono rispettivamente riportate le dosi equivalenti nel primo anno dopo l'incidente di Chernobyl [9] e gli impegni di dose equivalente [9] in diversi paesi o regioni.



**Figura 8** - Dose equivalente nel primo anno dopo l'incidente di Chernobyl. Valori medi per i diversi paesi



**Figura 9** - Impegno di dose equivalente in seguito all'incidente di Chernobyl. Valori medi per le diverse regioni

Nel 1990 vi fu un riesame della situazione nelle zone circostanti l'area di evacuazione. Il progetto confermò i valori delle dosi stimate e trovò che la salute della popolazione a quel tempo era comparabile a quella della popolazione negli insediamenti incontaminati vicini.

Per l'Italia, con una popolazione di 57 milioni di abitanti, assumendo il valore massimo di 1.2 mSv ed applicando il fattore di rischio ICRP di insorgenza di tumori mortali pari a  $5 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$  si hanno  $1.2 \times 10^{-3} \times 5.7 \times 10^7 \times 5 \times 10^{-2} \approx 3500$  casi di tumori mortali complessivi in tutti gli anni successivi all'incidente.

## 2.6. Esposizioni professionali

Ad esposizioni professionali sono soggette parecchie categorie di lavoratori che trattano con materiali radioattivi o che sono esposte nel luogo di lavoro a sorgenti di radiazioni naturali o artificiali.

Le dosi medie annuali a livello mondiale assorbite da lavoratori controllati e le dosi collettive associate per gli anni 1985 - 1989 sono riportate nella tabella 13 [1].

<i>Categoria occupazionale</i>	<i>Dose collettiva annua (Sv-uomo)</i>	<i>Dose media annua per lavoratore controllato (mSv)</i>
<b>Ciclo del combustibile nucleare</b>		
Industria mineraria	1200	4.4
Lavorazione del minerale	120	6.3
Processo di arricchimento	0.4	0.08
Fabbricazione del combustibile	22	0.8
Operazione del reattore	1100	2.5
Riprocessamento	36	3.0
Ricerca	100	0.8
Totale (arrotondato)	2500	2.9
<b>Altre occupazioni</b>		
Applicazioni industriali	510	0.9
Attività del Ministero della Difesa	250	0.7
Applicazioni mediche	1000	0.5
Totale (arrotondato)	1800	0.6
<b>Tutte le applicazioni</b>		
Totale complessivo (arrotondato)	4300	1.1

**Tabella 13** - Esposizioni professionali annue nel mondo di lavoratori controllati, 1985 - 1989

Lavoratori in occupazioni che comportano esposizioni avventizie a sorgenti naturali non sono di solito monitorati e le loro dosi<sup>3</sup> non compaiono in tabella 13. Appartengono a questa categoria gli equipaggi degli aerei e gli addetti in miniere non uranifere. La dose equivalente annua ai membri di un equipaggio è compresa tipicamente tra 2 e 3 mSv, con i valori più alti in certi aerei supersonici. Nell'industria dell'estrazione le dosi equivalenti annue oscillano tipicamente tra 1 e 2 mSv per minatori in miniere di carbone e tra 1 e 10 mSv per altri minatori.

<sup>3</sup>La dose collettiva annua da queste esposizioni è stimata intorno agli 8600 Sv-uomo, con il contributo principale proveniente da miniere di carbone.

## 2.7. Altre sorgenti

Esistono altre sorgenti (che danno peraltro mediamente contributi nettamente minoritari) quali radio in orologi luminescenti, torio in lenti, uranio in protesi dentarie ecc. [6].

Si cita in particolare il contributo dovuto all'industria dei fertilizzanti. La fosforite viene estratta in gran quantità ed usata principalmente nei fertilizzanti. Alte concentrazioni di uranio sono rilevabili nella maggior parte dei depositi di fosfato grezzo attualmente utilizzati. Il radon si disperde durante l'estrazione e la lavorazione dei minerali grezzi, mentre i fertilizzanti stessi possono accrescere il contenuto di radioisotopi negli alimenti. Tale contaminazione è di solito scarsa, ma aumenta se il fertilizzante è introdotto nel suolo sotto forma liquida e se i prodotti a base di fosfato vengono utilizzati per l'alimentazione degli animali. Questi prodotti, infatti, sono largamente usati come aggiunta al mangime del bestiame e, se dati alle mucche da latte, alzano notevolmente i livelli di radio in esso. L'industria dei fertilizzanti fosfatici produce annualmente un impegno di dose equivalente collettivo di circa 10000 Sv-uomo [6].

Un sottoprodotto dell'industria dei fosfati è il gesso fosfatico usato come sostituto del gesso naturale nei materiali edili; all'attuale produzione annua è associato un impegno di dose equivalente collettivo di circa 300000 Sv-uomo. Nell'edilizia sono anche utilizzate scorie di silicato di calcio con concentrazioni di  $1300 \div 2200$  Bq/Kg di  $^{226}\text{Ra}$ ; si tratta di un sottoprodotto della combustione del carbone.

### 3. Inalazione di radon, grandezze dosimetriche ed effetti

Il radon, gas nobile, può essere emanato dai materiali ove è stato generato e diffondere nell'atmosfera. Di preminente importanza è l'emanazione di  $^{222}\text{Rn}$ , che ha  $T = 3.823$  giorni. Meno rilevante è l'emanazione di  $^{220}\text{Rn}$  che, in virtù del suo tempo di dimezzamento molto più breve ( $T = 55$  s), può decadere con maggiore probabilità nei prodotti solidi suoi discendenti e non raggiungere l'atmosfera. Trascurabile è l'emanazione di  $^{219}\text{Rn}$  sia per il breve tempo di dimezzamento ( $T = 4.0$  s) che per la bassa frazione di  $^{235}\text{U}$  presente nell'uranio naturale (0.00725).

Sia il  $^{222}\text{Rn}$  che il  $^{220}\text{Rn}$  danno contributi alla dose equivalente; l'UNSCEAR 93 (tabella 1) valuta i seguenti valori medi della dose equivalente [1] :

per il  $^{222}\text{Rn}$  :  $1.2 \text{ mSv y}^{-1}$   
per il  $^{220}\text{Rn}$  :  $0.07 \text{ mSv y}^{-1}$

Vista la netta prevalenza del contributo del  $^{222}\text{Rn}$  in genere, con il termine di radon, ci si riferisce al  $^{222}\text{Rn}$ .

Il radon emanato dalla superficie terrestre in aria libera è rapidamente disperso e diluito da turbolenze e moti convettivi. Concentrazioni significative possono essere riscontrate se il Rn viene rilasciato in ambienti chiusi, come miniere sotterranee ed abitazioni. In tali ambienti la concentrazione in aria di Rn è inversamente proporzionale al rateo di ventilazione. Nelle abitazioni le maggiori fonti di  $^{222}\text{Rn}$  sono suolo e materiali edilizi. Generalmente predomina il contributo del suolo [6] [10].

#### 3.1. Grandezze dosimetriche

Le grandezze di dose sono grandezze correlate all'energia ceduta dalla radiazione ionizzante al tessuto umano. I decadimenti del radon e dei suoi figli a breve  $T$  portano all'emissione di radiazione  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  (tabella 5). Ai fini della dose assorbita dall'organismo è nettamente predominante il contributo della radiazione  $\alpha$  emessa dai figli a breve  $T$  del radon, e cioè dal  $^{218}\text{Po}$  e dal  $^{214}\text{Po}$  nel caso del  $^{222}\text{Rn}$ . Non si considera l'emissione di  $\alpha$  del  $^{222}\text{Rn}$  che, essendo un gas nobile, una volta inalato viene riesalato con bassissime probabilità di decadere durante il transito nell'apparato respiratorio. Non si considera il  $^{210}\text{Pb}$  poiché ha  $T = 22.3$  y e quindi verrà probabilmente rimosso dall'apparato bronco polmonare prima che una sua frazione significativa possa decadere.

Il tessuto maggiormente coinvolto è l'epitelio bronchiale, avente spessore variabile approssimativamente tra 10 e 100  $\mu\text{m}$ . Tenendo presente che il range delle particelle  $\alpha$  emesse dai figli del radon è di qualche decina di  $\mu\text{m}$ , si ha che le  $\alpha$  incidenti sull'epitelio bronchiale cedono ad esso pressoché tutta la loro energia.

##### 3.1.1. Energia Potenziale Alfa

L'energia potenziale alfa  $\epsilon_p$  di un atomo è l'energia totale alfa emessa nel decadimento dell'atomo e dei suoi discendenti attraverso l'intera famiglia radioattiva a cui appartiene [11].

Il termine potenziale si riferisce al fatto che un determinato atomo ha la "capacità" di produrre, in virtù di una sequenza di decadimenti, un certo ammontare di energia per decadimento alfa.

L'energia potenziale alfa viene espressa in energia prodotta per atomo [MeV] ([J]) oppure in energia prodotta per unità di attività [MeV Bq<sup>-1</sup>] ([J Bq<sup>-1</sup>]) valendo in questo caso

$$\frac{\epsilon_p}{\lambda_r} = \frac{\epsilon_p T_r}{\ln 2}$$

dove  $\lambda_r$  è la costante di decadimento del radionuclide considerato. Valori di  $\epsilon_p$  e  $\epsilon_p \lambda_r^{-1}$  sono elencati in tabella 14 per decadimenti della progenie del <sup>222</sup>Rn [11].

Isotopo	T	Energia potenziale alfa			
		Per atomo ( $\epsilon_p$ )		Per unità di attività ( $\epsilon_p \lambda_r^{-1}$ )	
		(MeV)	(10 <sup>-12</sup> J)	(MeV Bq <sup>-1</sup> )	(10 <sup>-10</sup> J Bq <sup>-1</sup> )
<sup>218</sup> Po	3.05 min	13.69	2.19	3615	5.79
<sup>214</sup> Pb	26.8 min	7.69	1.23	17840	28.6
<sup>214</sup> Bi	19.7 min	7.69	1.23	13250	21.2
<sup>214</sup> Po	164 $\mu$ s	7.69	1.23	$2 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{-6}$

**Tabella 14** - Energia potenziale alfa dei figli a breve T del <sup>222</sup>Rn

### 3.1.2. Concentrazione di energia potenziale alfa in aria (PAEC)

La *concentrazione di energia potenziale alfa in aria* è data dalla somma delle energie potenziali alfa di tutti gli atomi di una qualsiasi miscela di figli a breve T del radon presenti per unità di volume di aria. Se  $c_{act,i}$  è la concentrazione di attività dell'i-esimo nuclide figlio, allora la concentrazione di energia potenziale alfa è data da [10]

$$c_p = \sum_i c_{p,i} = \sum_i c_{act,i} \left( \frac{\epsilon_{p,i}}{\lambda_{r,i}} \right)$$

L'unità comune per questa grandezza è il J m<sup>-3</sup> = 6.24×10<sup>12</sup> MeV m<sup>-3</sup>. L'unità storica di misura usata per descrivere la concentrazione di energia potenziale alfa della progenie a breve T del radon è il *working level* (WL). Un WL è rappresentato da una qualsiasi combinazione di prodotti a breve tempo di dimezzamento del decadimento del radon (<sup>218</sup>Po, <sup>214</sup>Pb, <sup>214</sup>Bi e <sup>214</sup>Po) in un litro di aria che emetta 1.3×10<sup>5</sup> MeV di energia potenziale alfa. Il fattore numerico 1.3×10<sup>5</sup> deriva dall'energia potenziale alfa posseduta da <sup>218</sup>Po, <sup>214</sup>Pb, <sup>214</sup>Bi e <sup>214</sup>Po in equilibrio radioattivo con 100 pCi di <sup>222</sup>Rn. I principali parametri numerici sono mostrati in tabella 15; si noti come il contributo principale venga dal <sup>214</sup>Pb in quanto, avendo il T più grande, è presente con il maggior numero di atomi nella miscela radioattiva.

Radionuclide	T	Numero di atomi per 100 pCi	Energia potenziale alfa per atomo ( MeV atomo <sup>-1</sup> )	Energia potenziale totale alfa ( MeV )
<sup>222</sup> Rn	3.823 d	$1.76 \times 10^6$		
<sup>218</sup> Po	3.05 min	977	13.69	$0.134 \times 10^5$
<sup>214</sup> Pb	26.8 min	8590	7.69	$0.661 \times 10^5$
<sup>214</sup> Bi	19.7 min	6310	7.69	$0.485 \times 10^5$
<sup>214</sup> Po	164 $\mu$ s	0.0009	7.69	$0.000 \times 10^5$
<b>Totale</b>				<b><math>1.3 \times 10^5</math></b>

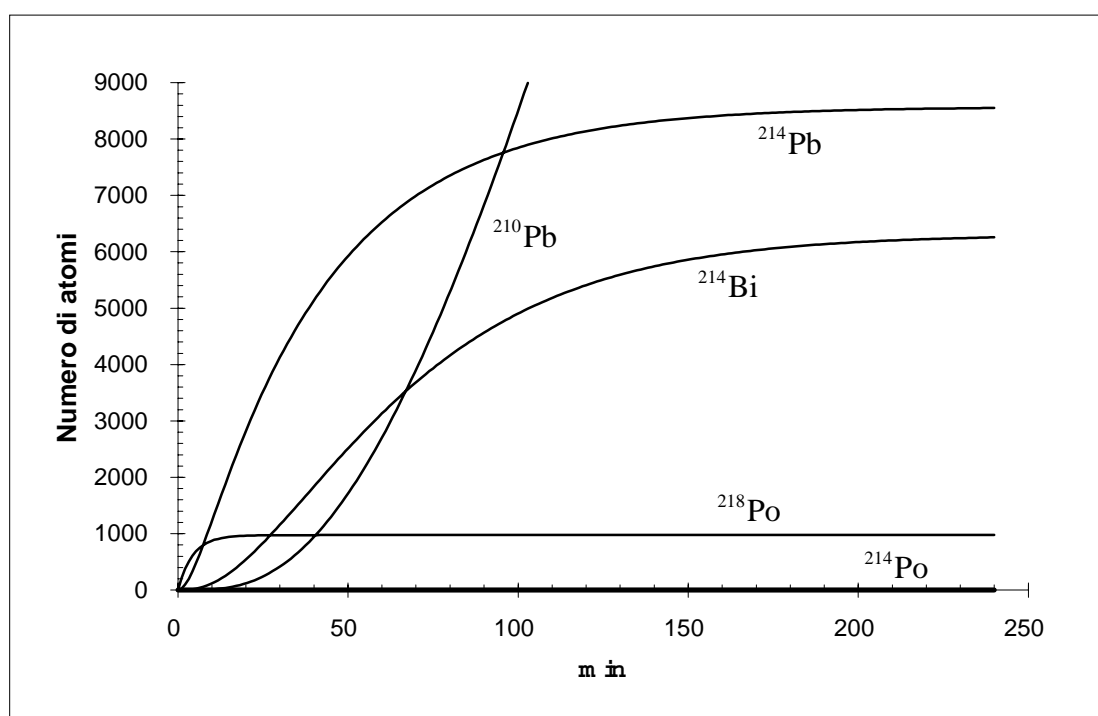
**Tabella 15** - Contributi all'energia potenziale  $\alpha$  posseduta da una miscela di 100 pCi di <sup>222</sup>Rn in equilibrio con i suoi figli a breve T

La figura 10 mostra le modalità di accumulo nel tempo della progenie del <sup>222</sup>Rn. In figura 11 è riportato un grafico che mostra come varia nel tempo il contributo al WL del <sup>218</sup>Po, <sup>214</sup>Pb e del <sup>214</sup>Bi (quello del <sup>214</sup>Po è trascurabile a causa del suo basso T) partendo da una sorgente costituita da radon puro.

Per le conversioni di unità di misura si ha:

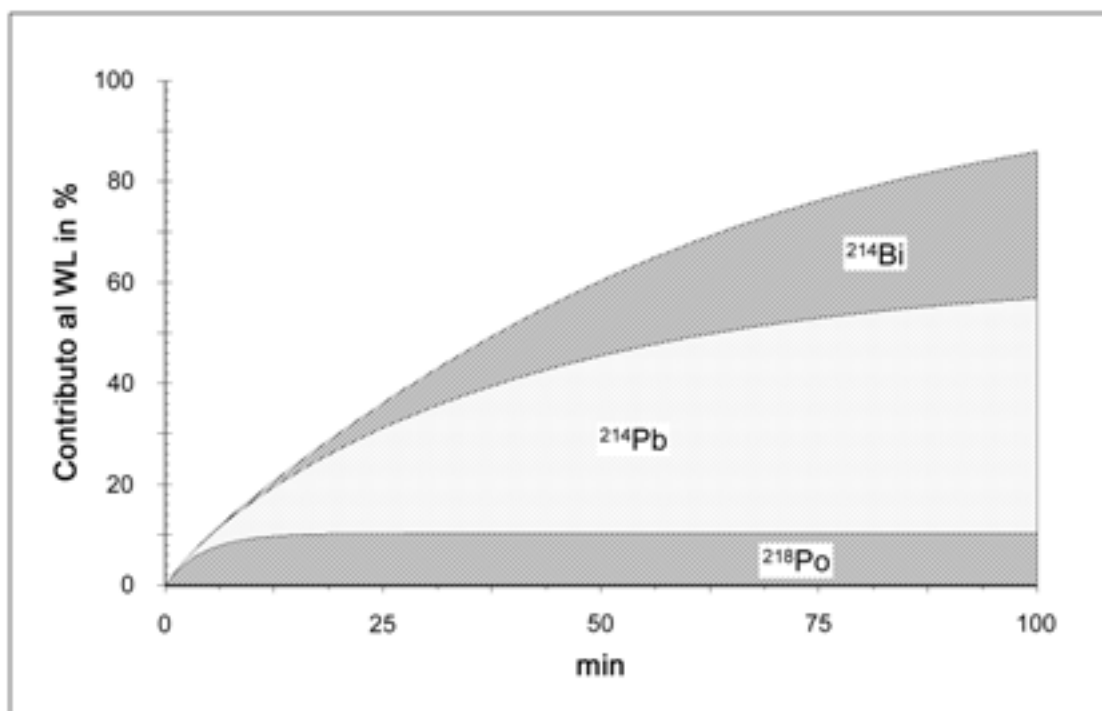
$$1 \text{ WL} = 1.3 \times 10^5 \text{ MeV l}^{-1} = 2.08 \times 10^{-5} \text{ J m}^{-3}$$

$$1 \text{ WL} \rightarrow 100 \text{ pCi l}^{-1} = 3700 \text{ Bq m}^{-3} \text{ di } ^{222}\text{Rn}$$



**Figura 10** - Accumulo della progenie del radon





**Figura 11** - Incrementi temporali dei contributi al Working Level

### 3.1.3. Concentrazione equilibrio equivalente di radon in aria (EEC)

La *concentrazione equilibrio equivalente di radon (EEC)* rappresenta quella concentrazione di attività del radon in equilibrio con i suoi figli a breve T che ha la stessa concentrazione di energia potenziale alfa del miscuglio non in equilibrio e pertanto viene misurata in Bq m<sup>-3</sup>. Tale definizione conduce alla seguente relazione [10] :

$$EEC_{Rn} = 1.81 \times 10^8 c_p \text{ per la progenie del } ^{222}\text{Rn}$$

essendo

$$\begin{aligned} EEC & \text{ in Bq m}^{-3} \\ c_p & \text{ in J m}^{-3} \end{aligned}$$

### 3.1.4. Fattore di equilibrio in aria (F)

Il *fattore di equilibrio F* è definito come il rapporto tra la concentrazione equilibrio equivalente e la concentrazione di attività reale del nuclide progenitore (Rn o Tn) in aria :

$$F = \frac{EEC}{c_{act}}$$

$F$  caratterizza il disequilibrio tra il nuclide progenitore e la miscela dei suoi figli a breve  $T$  in termini di energia potenziale alfa [10].

Per gli ambienti domestici si assume come valore di riferimento  $F = 0.4$ .

### 3.1.5. Esposizione

Per descrivere l'esposizione al Rn ed ai suoi figli a breve  $T$  il WL dovrebbe essere moltiplicato per la quantità media di aria inspirata nell'unità di tempo, per una grandezza che indichi il grado di ritenzione dell'aria nei polmoni e per la durata dell'esposizione.

In pratica si considera la sola durata dell'esposizione. L'unità di misura storica dell'esposizione è il *working level month* (WLM), dato dal prodotto di un WL per il mese medio lavorativo, cioè per 160 ore [10].

Nel sistema SI la quantità *esposizione ai figli del radon* ( $E$ ) di un individuo è definita come l'integrale nel tempo della concentrazione di energia potenziale alfa  $c_p$  dovuta alla miscela della progenie del radon, oppure della corrispondente concentrazione equilibrio equivalente di radon EEC, alla quale l'individuo è esposto per un dato periodo di tempo  $T$  [10]:

$$E_p(t) = \int_0^T c_p(t) dt \quad \text{in J h m}^{-3}$$

$$E_{act}(t) = \int_0^T EEC(t) dt \quad \text{in Bq h m}^{-3}$$

$$1 \text{ WLM} = 3.5 \times 10^{-3} \text{ J h m}^{-3}$$

$$1 \text{ WLM} = 6.3 \times 10^5 \text{ Bq h m}^{-3}$$

## 3.2. Cancro polmonare indotto da radiazione

### 3.2.1. Studi epidemiologici

Il primo effetto dannoso dell'esposizione ad un campo di radiazione fu scoperto sin dal 1500 tra i minatori della regione Schneeberg-Jachymov nello Erzgebirge (Boemia). Questo, denominato *Schneeberger Krankheit*, fu diagnosticato come cancro polmonare nel 1879. Si incominciò ad ipotizzare una correlazione con il radon solo nei primi decenni del XX secolo quando furono riscontrate elevate concentrazioni di tale gas nelle miniere di quella regione. Comunque, la vera causa del cancro, ovvero l'inalazione dei figli del radon a breve  $T$ , fu individuata solo nel 1950 con i primi studi di dosimetria polmonare. A partire da allora iniziarono studi epidemiologici (tabella 16) sull'esposizione al radon dei lavoratori in miniera.

Gruppi di studio del periodo di follow-up	Numero di minatori	Persone anno a rischio	Esposizione media cumulativa (WLM)	Numero di morti da cancro polmonare	
				Osservati	Attesi
Minatori di Uranio					
Colorado, USA, 1951-1982, esposizione cumulativa < 2000 WLM <sup>a</sup>	2975	66237	510	157	48.7
New Mexico, USA, 1957-1985	3469	66500	111	68	17
Ontario, Canada, 1955-1981	11076	217810	37	87	57.9
Beaverlodge, Saskatchewan, Canada, 1950-1980	6847	114170	44 (22) <sup>b</sup>	65	28.7
Bohemia, 1953-1985	4042	97913	227	574	122
Francia, 1946-1985	1785	44005	70	45	21.1
Minatori di acciaio					
Malmberget, Svezia, 1951-1976	1292	27397	98	51	14.9
Totale relativo a tutti gli studi	31486	635022	120 <sup>c</sup>	1047	310

<sup>a</sup> Le esposizioni più alte furono eliminate a causa della probabilità dell'effetto di morte cellulare sull'incidenza di cancro polmonare

<sup>b</sup> Valore originale (*Howe et. al.*, 1986)

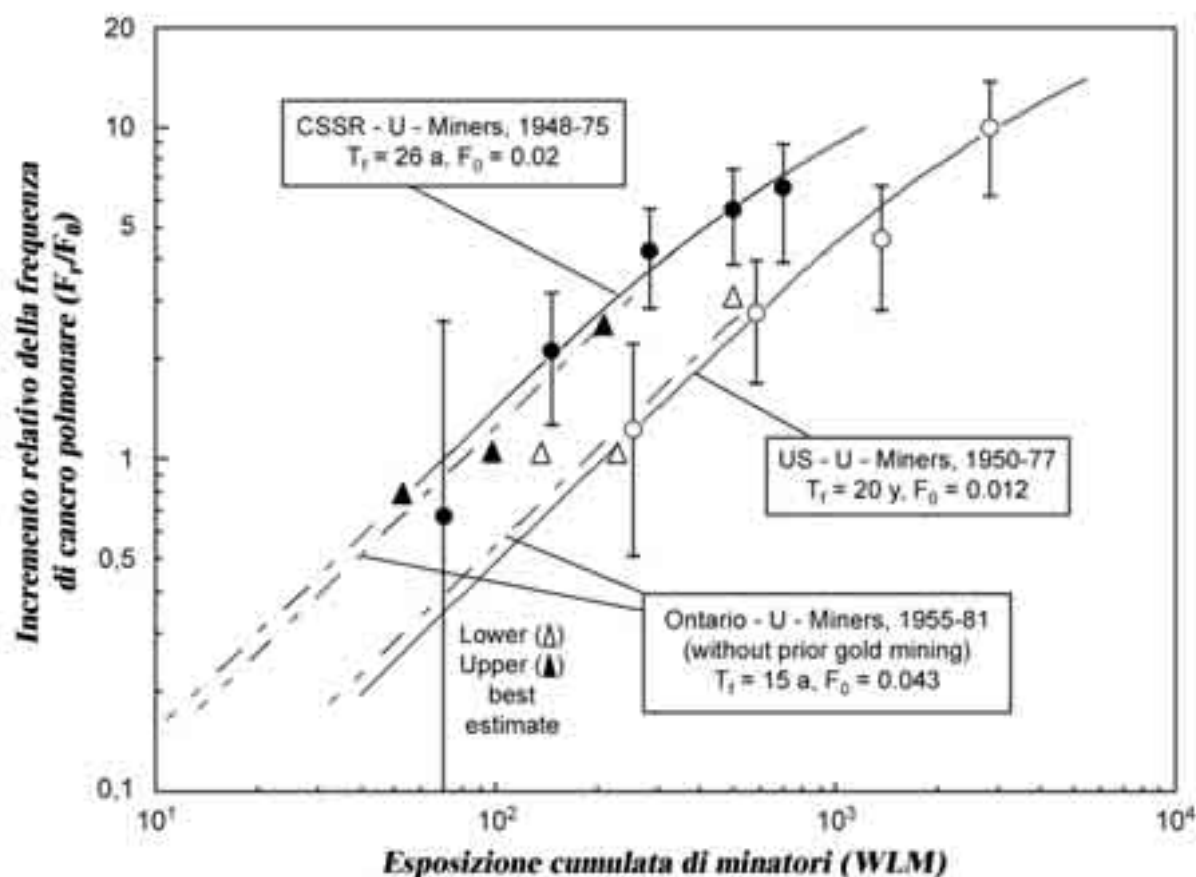
<sup>c</sup> Pesato sul numero di minatori in ogni studio

**Tabella 16** - Risultanze delle indagini condotte su sette gruppi di minatori

L'eccesso di tumori polmonari riscontrato tra i minatori rispetto al numero d'insorgenze previsto indica una forte correlazione con l'esposizione ai figli del radon [10].

### 3.2.2. Relazione tra esposizione e rischio

Dagli studi condotti in miniere uranifere si è risaliti alla correlazione tra esposizione e rischio associato al tumore polmonare. La figura 12 mostra l'incremento della frequenza del cancro polmonare in funzione dell'esposizione cumulata ai figli del <sup>222</sup>Rn. Per i minatori in Ontario, Canada, sono riportate delle stime inferiori e superiori. Da notare come i dati relativi ai minatori canadesi e cecoslovacchi assumono un'evidenza statisticamente significativa solo oltre 50 ÷ 100 WLM.



**Figura 12** - Incremento relativo della frequenza di cancro polmonare tra minatori d'uranio in funzione della loro esposizione cumulata ai figli del  $^{222}\text{Rn}$  (banda di confidenza del 95%) [10]

Nelle abitazioni, con la concentrazione di riferimento [10] (circa  $40 \text{ Bq m}^{-3}$ ), si hanno esposizioni di 0.2 WLM per anno e quindi di 10 WLM dopo 50 anni; dalla curva mediana di quelle tracciate in figura 12 si osserva un incremento relativo della frequenza di tumori polmonari pari al 10% in corrispondenza a 10 WLM.

### 3.3. Valutazione dell'esposizione annua

La ICRP raccomanda la seguente relazione di riferimento per la valutazione dell'esposizione complessiva annua ai figli del  $^{222}\text{Rn}$  a breve T [10] :

$$E = 5000\overline{c_1} + 2000\overline{c_2} + 1700\overline{c_3} \quad \text{Bq h m}^{-3}$$

essendo

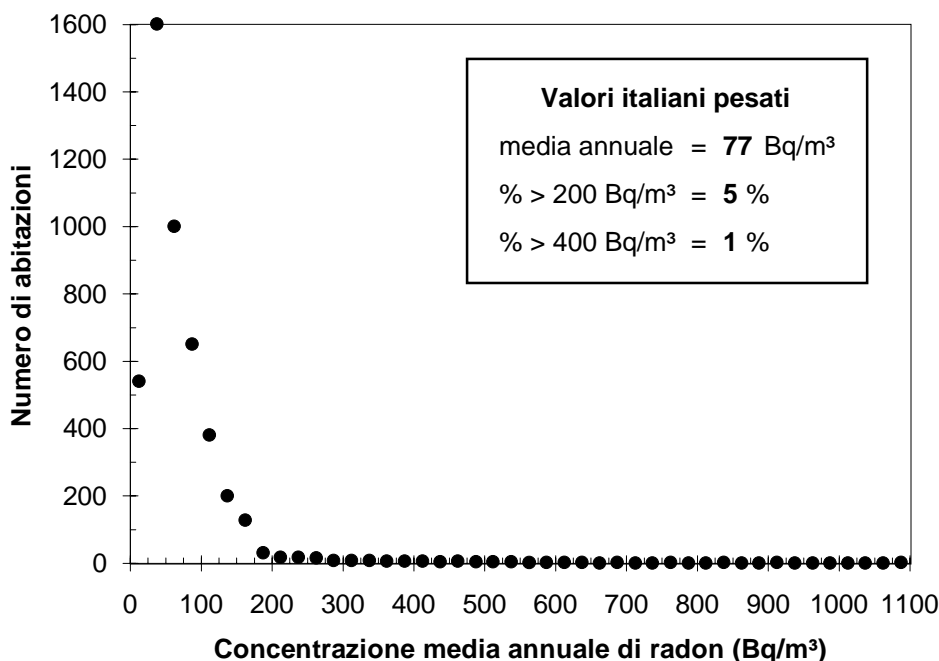
5000 : ore trascorse annualmente nell'abitazione

2000 : ore trascorse annualmente in altri luoghi chiusi

1700 : ore trascorse annualmente all'aperto

Tali tempi di permanenza possono essere applicati alla realtà italiana come risultato dalla *Indagine nazionale sulla radioattività naturale nelle abitazioni* condotta da ISS e ANPA [4].

I risultati ottenuti nella campagna nazionale di misura della concentrazione di radon indoor sono illustrati in figura 13 [4].



**Figura 13** - Distribuzione media annuale di radon nel campione di abitazioni e percentuali di case con concentrazioni maggiori di 200 e 400 Bq m<sup>-3</sup>. I valori medi nazionali riportati nel riquadro sono ottenuti dai valori medi di ogni regione pesati sulla base del relativo numero di famiglie residenti

Si evidenzia una concentrazione media annuale di Rn di 77 Bq m<sup>-3</sup>. Si assume tale valore come rappresentativo della concentrazione di radon nelle abitazioni e negli altri luoghi chiusi. Per l'aperto si può assumere il valore ICRP di 6 Bq m<sup>-3</sup>.

Assumendo  $F = 0.4$  nei luoghi chiusi e  $F = 0.7$  all'aperto [12] in Italia si ha mediamente un'esposizione complessiva annua ai figli del radon di

$$7000 \times 77 \times 0.4 + 1700 \times 6 \times 0.7 = 222740 \text{ Bq h m}^{-3}$$

ovvero di circa 0.3 WLM/anno dovuta per il 97% al radon in luoghi chiusi (il 70% in abitazioni) e solo per il 3% al radon all'aperto; ovviamente al crescere della concentrazione di radon indoor diviene sempre più trascurabile il contributo all'aperto. Con una vita media di 75 anni a fine vita si totalizzano circa 20 WLM ovvero 70 mJ h m<sup>-3</sup>.

Il coefficiente di fatalità suggerito dalla ICRP [12] è  $8 \times 10^{-5}$  per mJ h m<sup>-3</sup> sia per la popolazione che per i lavoratori.

Per valutare l'esposizione dei lavoratori (A e B del D.L.vo 230/95) è utile avere un coefficiente di conversione tra esposizione al radon e dose equivalente. La ICRP 65 raccomanda 1.43 mSv per mJ h m<sup>-3</sup> ( $1 \text{ mJ h m}^{-3} \rightarrow 0.282 \text{ WLM}$ ) ovvero 5 mSv per WLM.

Il controllo dell'esposizione può avvenire in modo semplificato con il controllo della concentrazione di radon. Assumendo  $F = 0.4$  per abitazioni e luoghi di lavoro la ICRP dà il fattore approssimativo di conversione  $1 \text{ mSv} \rightarrow 150 \text{ Bq m}^{-3}$  con tempi di permanenza di 2000 ore/anno; con 7000 ore/anno si ha grossolanamente  $1 \text{ mSv} \rightarrow 50 \text{ Bq m}^{-3}$ .

Nel D.L.vo 230/95 per l'esposizione di lavoratori ai figli del  $^{222}\text{Rn}$  si dà un valore limite di riferimento quinquennale di 9.6 WLM, ovvero in media di circa 2 WLM/anno. In termini di EEC questo significa operare per 2000 ore annue a  $600 \text{ Bq m}^{-3}$  che, assumendo  $F = 0.4$ , dà una concentrazione di  $^{222}\text{Rn}$  di  $1500 \text{ Bq m}^{-3}$ .

### 3.4. Considerazioni dosimetriche sul comportamento dei prodotti di decadimento del $^{222}\text{Rn}$

In un ambiente in cui la concentrazione di radon è stabile, e dove ogni prodotto di decadimento viene rimosso soltanto dal suo successivo decadimento, si raggiunge uno stato di equilibrio (equilibrio secolare) quando tutti i radionuclidi sono presenti con la stessa attività. In un ambiente chiuso, con un fissato rateo di ventilazione, le concentrazioni del radon e dei suoi discendenti sono inferiori a quelle prevedibili in assenza di ventilazione.

Il comportamento dei prodotti di decadimento è tuttavia complicato dalla loro attività chimica; il fatto che essi possono aderire sia al particolato presente nell'aria che su superfici e che tali "ratei di attaccamento" variano con le condizioni ambientali, rende estremamente difficile caratterizzare il loro stato.

Si evidenziano vari meccanismi attraverso cui un generico prodotto di decadimento può mutare il suo stato o la sua presenza nell'ambiente. Un prodotto di decadimento può aderire al particolato atmosferico, un processo che viene considerato reversibile soltanto per il  $^{218}\text{Pb}$  a causa della sensibile energia di rinculo acquisita in seguito al decadimento  $\alpha$ ; attaccato o no esso può essere rimosso dall'aria indoor tramite deposizione su superfici, ventilazione, dispositivi di purificazione dell'aria e decadimento radioattivo. È importante sottolineare come il rateo di deposizione dipenda fortemente dal fatto che il nuclide sia attaccato o meno ad aerosol e, in quest'ultimo caso, dalle caratteristiche dell'aerosol stesso.

La presenza di aerosol determina fortemente la dose derivante da una determinata concentrazione di radon.

I valori di riferimento della dose media bronchiale per esposizione ad 1 WLM di energia potenziale alfa in abitazioni sono mostrati in tabella 17 in funzione dell'AMD (activity median diameter); per valori di AMD minori di  $0.01 \mu\text{m}$  si assume che i prodotti di decadimento a breve T del radon non siano attaccati ad aerosol [13].

Dimensione aerosol (AMD, $\mu\text{m}$ )	Dose assorbita ( $\text{mGy WLM}^{-1}$ )
Non attaccato	130
0.05	20
0.1	10
0.15	7
0.2	5
0.3	4
0.4 - 0.5	3

**Tabella 17** - Valori di riferimento per la dose media bronchiale da esposizione a 1 WLM di energia potenziale alfa in abitazioni [13]

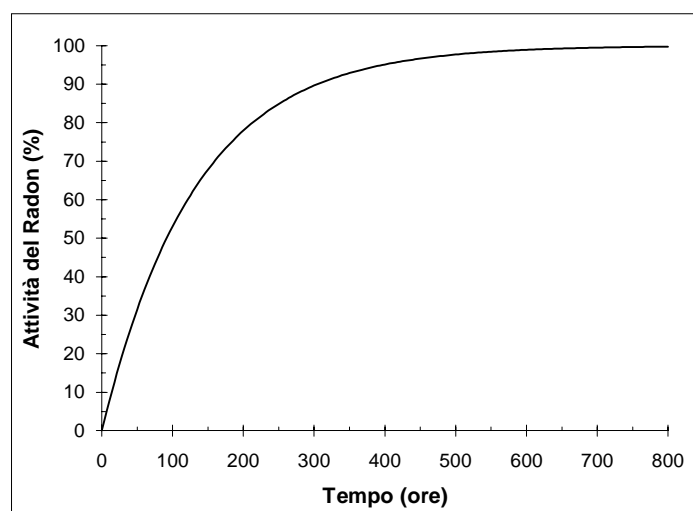
Si noti che la dose assorbita cresce al diminuire della dimensione dell'aerosol. Al diminuire della concentrazione di aerosol nell'aria corrispondono maggiori quantità di radionuclidi depositati sulle superfici e quindi minori fattori di equilibrio  $F$ . Tale diminuzione può essere anche ottenuta purificando l'aria indoor, eliminando così direttamente anche i radionuclidi stessi dall'aria. Comunque il vantaggio derivante da minori  $F$  e quindi minori EEC è bilanciato dal fatto che un maggior contributo alla dose è ora associato ai radionuclidi non attaccati ad aerosol [14].

Cioè sembra che la decrescita di  $F$  sia compensata da una crescita della frazione non attaccata e cioè che la dose in ambiente indoor sia relativamente indipendente dal fattore di equilibrio; quindi appare appropriato l'utilizzo di un fattore di conversione basato sulla concentrazione del  $^{222}\text{Rn}$ .

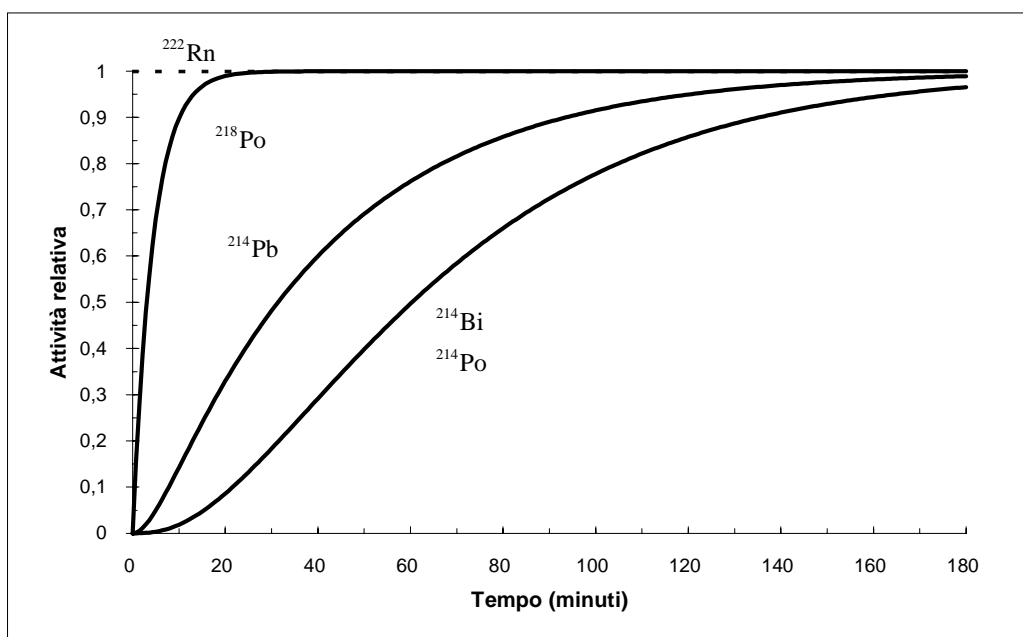
## Appendice 1. Equilibrio secolare

Si abbia il generico nuclide di tipo 1 che decade in quello di tipo 2 il quale a sua volta decade in quello di tipo 3 e così via. Se il capostipite (tipo 1) ha una vita media molto maggiore di quelle di ogni altro componente della famiglia, dopo un tempo molto più lungo (almeno 4 ÷ 5 volte maggiore) dei tempi di dimezzamento  $T_i$  dei figli si raggiunge l'equilibrio secolare : ovvero l'uguaglianza delle attività di tutti i componenti la catena di decadimenti.

In particolare si raggiunge l'equilibrio secolare tra  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{222}\text{Rn}$  in circa 20 giorni (figura 14) e tra  $^{222}\text{Rn}$  e i figli a breve  $T$  in circa 3 ore (figura 15).



**Figura 14** - Formazione di  $^{222}\text{Rn}$  ( $T = 3.823$  giorni) da  $^{226}\text{Ra}$  ( $T = 1608$  anni)



**Figura 15** - Attività dei prodotti di decadimento a breve vita media in una sorgente costante di radon avente attività unitaria



## Appendice 2. Caratteristiche dei nuclidi cosmogenici

Nuclide	Rateo di produzione atmosferica di atomi ( $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	T	Radiazioni	Energia (MeV)	Intensità (%)
$^3\text{H}$	0.25	12.35 y	$\beta^-$	0.0185 (0.00568)	100
$^7\text{Be}$	$8.1 \times 10^{-2}$	53.3 d	$e_A$ $\gamma$	0.000054 0.47759	88 10.3
$^{10}\text{Be}$	$4.5 \times 10^{-2}$	$2.7 \times 10^{-6}$ y	$\beta^-$	0.555	100
$^{14}\text{C}$	2.5	5730 y	$\beta^-$	0.1561 (0.0493)	100
$^{22}\text{Na}$	$8.6 \times 10^{-5}$	2.60 y	$e_A$ $\beta^+$ $\gamma_1$ $\gamma_2$	0.00082 0.5459 (0.2156) 0.5110 1.27454	8.5 90.49 181.08 99.95
$^{26}\text{Al}$	$1.4 \times 10^{-4}$	$7.4 \times 10^5$ y	$\beta^+$ $\gamma_1$ $\gamma_2$ $\gamma_3$	1.16 0.5110 1.12967 1.80865	84.6 169.2 2.5 99.76
$^{32}\text{Si}$	$1.6 \times 10^{-4}$	280 y	$\beta^-$	0.21	100
$^{32}\text{P}$	$8.1 \times 10^{-4}$	14.29 d	$\beta^-$	1.7089 (0.6950)	100
$^{33}\text{P}$	$6.8 \times 10^{-4}$	24.8 d	$\beta^-$	0.248	100
$^{35}\text{S}$	$1.4 \times 10^{-3}$	88.0 d	$\beta^-$	0.1673 (0.04879)	100
$^{36}\text{Cl}$	$1.1 \times 10^{-3}$	$3.01 \times 10^5$ y	$e_{A1}$ $e_{A2}$ $\beta^-$	0.00016 0.0021 0.7089 (0.2514)	3.2 1.5 98.1
$^{37}\text{Ar}$	$8.3 \times 10^{-4}$	35.0 y	$\gamma$	0.815 (max)	100
$^{39}\text{Cl}$	$1.6 \times 10^{-3}$	56.2 min	$\beta_1^-$ $\beta_2^-$ $\beta_3^-$ $\gamma_1$ $\gamma_2$ $\gamma_3$ $\gamma_4$ $\gamma_5$	1.91 2.18 3.45 0.25026 0.98579 1.09097 1.2672 1.51731	85 8 7 44 2 2 50 35
$^{39}\text{Ar}$	$4.0 \times 10^{-3}$	269 y	$\beta^-$	0.565	100

## Bibliografia

1. UNSCEAR. "Sources, effects and risks of ionizing radiation". Report to the General Assembly. United Nations New York 1993
2. Von Eugen Sauter "Grundlagen des Strahlenschutzes". Karl Thiemig AG
3. C.N.E.N. C. Faloci, F. Lucci, A. Susanna. "Elementi di fisica sanitaria". 1971
4. Agenzia Nazionale per la Protezione Ambientale e Istituto Superiore di Sanità. F. Bochicchio, G. Campos Venuti, C. Nuccetelli, S. Piermattei, S. Risica, L. Tommasino, G. Torri "Indagine nazionale sulla radioattività naturale nelle abitazioni". 1994
5. UNSCEAR. "Sources, effects and risks of ionizing radiation". Report to the General Assembly. United Nations New York 1988
6. UNEP. "Radiation: Doses, Effects, Risks". 1985
7. A. G. Gonzales, J. Anderer "Radiazioni, e radiazioni: l'energia nucleare in prospettiva". Energia Nucleare, anno 6, n° 3, pp. 10 - 21, 1989
8. Annals of the ICRP. "1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection". ICRP n° 60, 1990
9. G. Silini "Il rapporto UNSCEAR 88". Energia Nucleare, anno 5, n° 3, pp. 9 - 27, 1988
10. Annals of the ICRP. "Lung cancer risk from indoor exposures to radon daughters". ICRP n° 50, 1987
11. C. R. Cothorn and J. E. Smith Jr. "Environmental radon". 1987
12. Annals of the ICRP. "Protection against radon-222 at home and at work". ICRP n° 65, 1993
13. American Chemical Society. "Radon and its decay products". Ed. Hopke P. K. 1987
14. W. W. Nazaroff and A. V. Nero "Radon and its decay products in indoor air". J. Wiley & sons Inc. 1988

## **Allegato B**

# **Radon grab sampling in water by means of radon transfer in activated charcoal collectors**

**Gianfranco Galli, Claudio Guadoni, Carlo Mancini** - University of Rome "La Sapienza". Department of Nuclear Engineering and Conversion of Energy.

*Il Nuovo Cimento*, vol. 22 C, n. 3-4, 1999.

### **Abstract**

The proposed portable device is suitable for radon surveys in water-bearing strata. It allows a complete transfer in activated charcoal canisters of radon dissolved in water collected with a 0,6 l bottle. The detection is performed in laboratory with a low background  $\gamma$ -ray spectrometer utilizing a  $3'' \times 3''$  NaI(Tl) scintillator only after about ten hours. This time is necessary to let radon be uniformly distributed within the activated charcoal.

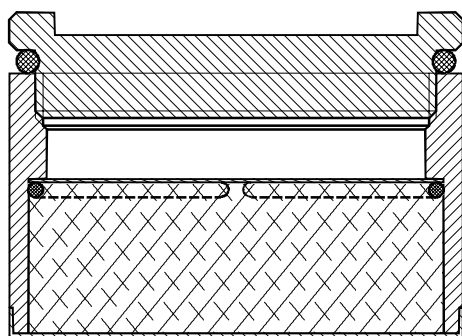
### **Introduction**

The concentration of  $^{222}\text{Rn}$  in water can be determined by detection of radiation  $\alpha$  emitted by  $^{218}\text{Po}$  and  $^{214}\text{Po}$  or  $\gamma$  emitted by  $^{214}\text{Pb}$  and  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{222}\text{Rn}$  short-lived daughters.

The method proposed in this work stems from the widespread use of activated collectors in the measure of  $^{222}\text{Rn}$  concentration in air [1]. Collectors are generally metal boxes cylindrical in shape which contain activated charcoal. A collector of 6 cm in diameter set up by authors [2] is shown in fig. 1.

The activity of  $^{222}\text{Rn}$  adsorbed during exposure is determined with  $\gamma$  spectrometry, usually with a NaI(Tl) detector [3]. Main  $\gamma$  lines investigated are those emitted in  $\beta$  decays of  $^{214}\text{Pb}$  (242, 295 and 352 keV) and  $^{214}\text{Bi}$  (609 keV). For calculations it is necessary to have a calibrating collector which contains a known activity of  $^{226}\text{Ra}$  in equilibrium with  $^{222}\text{Rn}$ .

As a consequence, laboratories equipped for measurements of  $^{222}\text{Rn}$  concentration in air find it useful and economical, from a point of view either monetary or operational, to assess the  $^{222}\text{Rn}$  concentration in water with the same technique of activated charcoals.



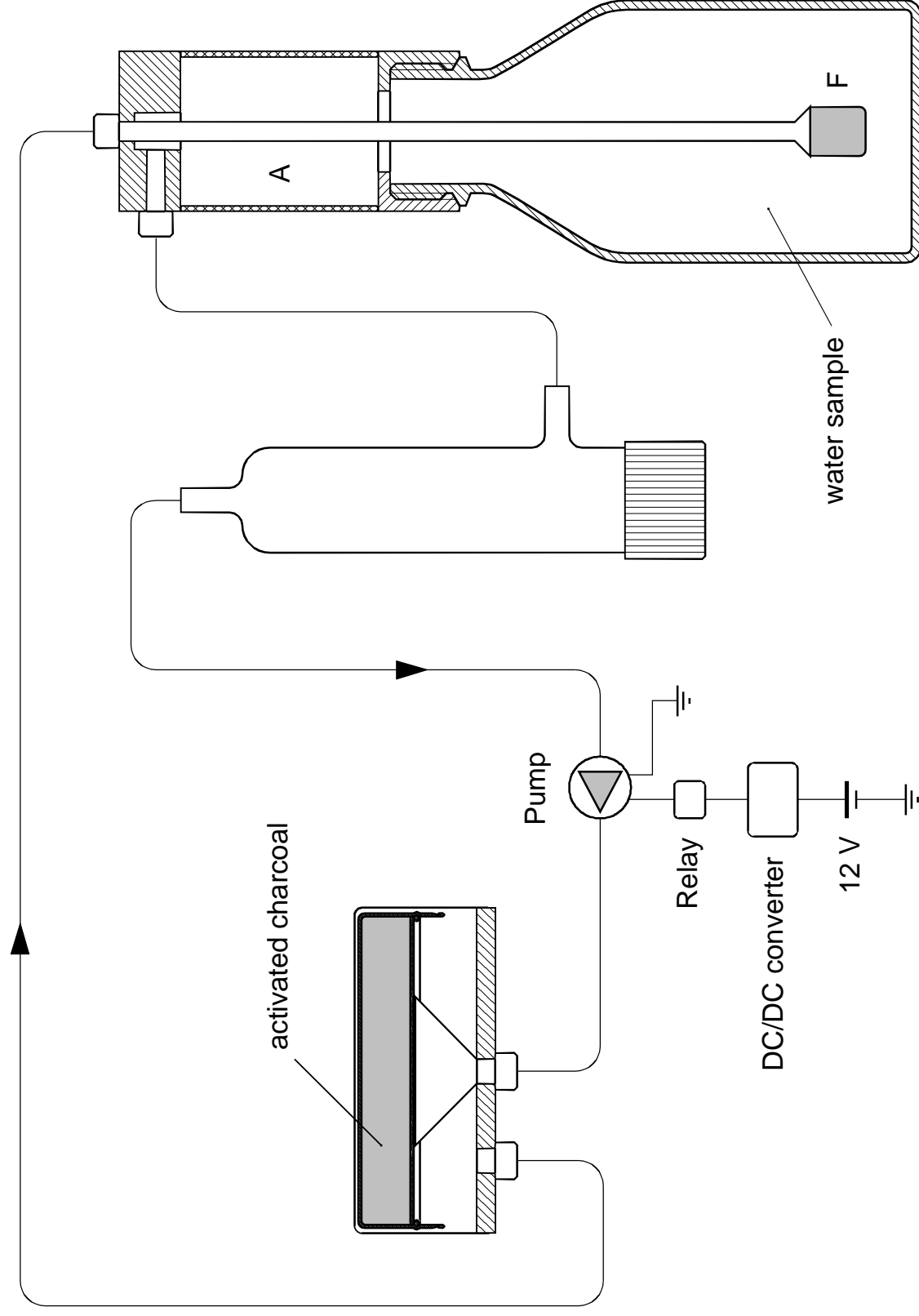
**Figure 1 :** Activated charcoal collector of 6 cm in diameter. Vertical section and photograph.

## Method

The water sample to be analysed is taken with a bottle having a large neck ISO 45 type of a nominal volume of 500 ml. The filling pipe is inserted deep in the bottle and the water is kept flowing until the complete renewal of contained fluid. The bottle, full to the brim, (real volume of 600 ml) is closed with a watertight cap provided with an expansion chamber A (fig. 2) in order to let the air

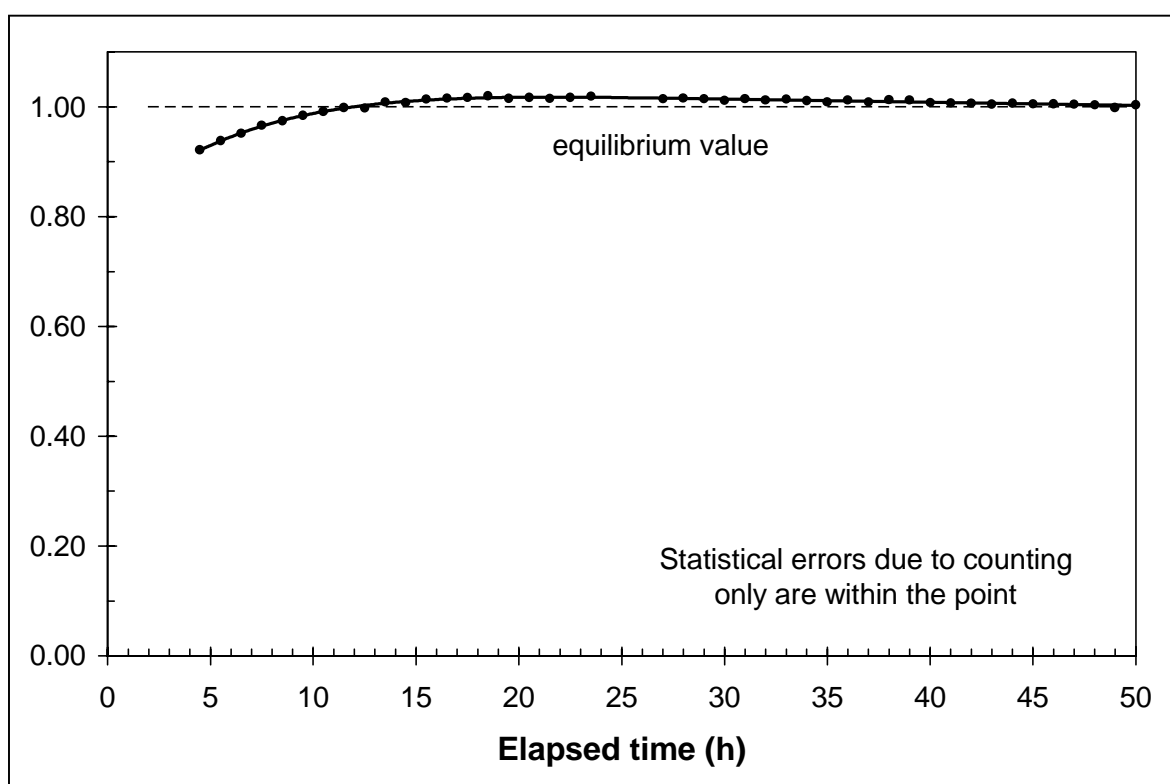
bubble. Furthermore, that cap is equipped with two quick connectors for air inlet and outlet. When the water sample has been taken, the bottle is inserted in a closed circuit where a diaphragm pump aspirates air from the bottle and pushes it toward the surface of the charcoal layer in the collector, which is enclosed in a small airtight chamber. Air comes out from the activated charcoal, reaches a fritted disk F placed at the end of a small brass pipe and finally bubbles through the water. Between the pump and the bottle there is a phial so as to prevent any micro-drop from getting to the pump.  $^{222}\text{Rn}$  taken out of the water [4] is adsorbed onto activated charcoal. The minimum flowing time necessary for a complete  $^{222}\text{Rn}$  transfer from water to activated charcoal is about two minutes with a nominal pump delivery capacity of 4 l/min. The increase in weight due to the water adsorbed in activated charcoal is less than 0.2 g.

At the end of the  $^{222}\text{Rn}$  transfer the collector is closed with an airtight cap. At first  $^{222}\text{Rn}$  is adsorbed within a narrow charcoal layer close to the center of the surface invested from the incoming air flow. Afterwards  $^{222}\text{Rn}$  diffuses inside the charcoal layer [5] mainly axially [6].



**Figure 2 :** Scheme of the degassing portable system.

The diffusion process makes time requested for achievement of maximum count larger than that needed for the establishment of radioactive equilibrium between  $^{222}\text{Rn}$  and its short-lived daughters; this is shown in fig. 3 where count rate is plotted versus time from  $^{222}\text{Rn}$  transfer to collectors. Counts in ordinate, which refer to a counting time of 15 min and have been obtained by integration over the whole  $^{222}\text{Rn}$  spectrum from  $\gamma$  line at 242 keV, are corrected in order to compensate for  $^{222}\text{Rn}$  decay ( $T = 3.82$  d) and normalized to the equilibrium value. The count rise at the beginning is due to the growth of short-lived daughters of  $^{222}\text{Rn}$ ; after about four hours  $^{222}\text{Rn}$  and its daughters reach radioactive equilibrium, nevertheless the curve has not reached a plateau since  $^{222}\text{Rn}$  is not uniformly distributed yet. Counts keep rising till a maximum; after that there is a slow decrease to the equilibrium value, reached after some tens of hours approximately and due to the radial diffusion of  $^{222}\text{Rn}$  which causes a decrease in geometrical efficiency of the detector.



**Figure 3 :** Normalized plot of count rate versus time elapsed from degassing.

In the degassing portable system we have realized, which makes use of collectors of 6 cm in diameter, the maximum count value overshoots the equilibrium value for less than 2%, as displayed in fig. 3, and therefore

it can be practically believed to have reached the equilibrium value after about 10 hours. However a specific table lets us correct values with correspondence to time from degassing.

The degassing portable system realized from IAT S.r.l. for the Department of Nuclear Engineering and Conversion of Energies of the University of Rome “La Sapienza” is shown in fig. 4. It is battery supplied (12 V) and equipped with 20 collectors for outdoor surveys.



**Figure 4** : Photograph of the degassing portable system.

Six water samples have been taken at a spring near Rome: in each sample a beaker Marinelli and a bottle for  $^{222}\text{Rn}$  transfer to the collector have been filled in parallel. Mean concentration values from beakers Marinelli and collectors of  $270 \pm 2$  Bq/l and  $273 \pm 4$  Bq/l respectively have been measured [7].

## Conclusions

The prototype we have realized will be employed from National Institute of Geophysics of Rome for surveys near Rome (Castelli Romani) and other places however distant from the laboratory of analysis. As a matter of fact distance is not a serious problem since collectors can arrive at the laboratory within 24 - 48 hours from the sampling via a fast carrier without detriment for the measure, stated the good tightness of collectors and the fairly high half time of  $^{222}\text{Rn}$  (3.82 d).

## Bibliography

- [1] U.S. EPA. *EERF standard operating procedures for  $^{222}\text{Rn}$  measurement using charcoal canisters*. EPA 520/5-87-005. June 1987.
- [2] Mancini C., Galli G., Giannelli G. in *Misura della concentrazione di radon in aria e acqua mediante la spettrometria gamma*. Acqua aria. **2** (1995).
- [3] De Luca A. and Mancini C. in *The measurement system for  $^{222}\text{Rn}$  monitoring with charcoal adsorption collectors*. Health Physics, **61** (1991).
- [4] Lucas H. F., Markun F. and Boulenger R. in *Methods for measuring radium isotopes: EMANOMETRY*. IAEA Technical Reports Series, **310** (1990).
- [5] Cohen B. L. and Cohen E. S. in *Theory and practice of radon monitoring with charcoal adsorption*. Health Physics, **45** (1983).
- [6] Vecchiet M. *Misura della concentrazione di radon in acqua*. Degree thesis. Department of Nuclear Engineering and Conversion of Energy, University of Rome “La Sapienza”, 1995.
- [7] Guadoni C. *Progetto di un apparato di misura per il monitoraggio della concentrazione di radon in acqua*. Degree thesis. Department of Nuclear Engineering and Conversion of Energy, University of Rome “La Sapienza”, 1996.



## **Allegato C**

# **Continuous measurement system of radon concentration in water by gamma radiation detection emitted by $^{214}\text{Bi}$ and $^{214}\text{Pb}$ decay.**

**Gianfranco Galli, Claudio Guadoni, Carlo Mancini** - University of Rome "La Sapienza". Department of Nuclear Engineering and Conversion of Energy.

*Il Nuovo Cimento*, vol. 22 C, n. 3-4, 1999.

### **Abstract**

Systematical and continuous measures of  $^{222}\text{Rn}$  concentration in ground water have shown a possible correlation between  $^{222}\text{Rn}$  anomalies and seismic events. The system proposed in this work will draw water from a source, fill a 0.69 l beaker Marinelli [1] and detect main  $\gamma$  lines emitted from  $^{222}\text{Rn}$  by using a 2'' $\times$ 2'' NaI(Tl) scintillator surrounded by a low background  $\gamma$  spectrometer [2].

### **Introduction**

Certain experimental evidences, particularly those collected in occasion of the Kobe earthquake [3] on 17 january 1995, have shown a possible correlation between the anomalies of  $^{222}\text{Rn}$  concentration in ground water and seismic events [4], [5], [6], [7]. In order to verify the existence of such correlation it is necessary to perform systematical and continuous measures of  $^{222}\text{Rn}$  concentration in ground water in areas frequently interested by seismic events, so as to collect significant data. In this way, we have realized the system described in this work, that will be installed in a deep well located in Frascati, in the area of Castelli Romani characterized by a significant seismic activity. Normally,  $^{222}\text{Rn}$  concentration in the water of the selected well is about 200 Bq/l.

### **Methods of measurement**

Methods used to measure  $^{222}\text{Rn}$  concentration in water are based on the detection of the radiation emitted by the decay of  $^{222}\text{Rn}$  itself and of its short-lived daughters. Measures are performed detecting alpha particles

emitted by  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{218}\text{Po}$  and  $^{214}\text{Po}$ , or the gamma rays emitted by  $^{214}\text{Pb}$  and  $^{214}\text{Bi}$ .

The most employed system uses scintillation flasks, called Lucas Cell [8], coupled with a photomultiplier tube. The scintillation induced by alpha particles on a thin layer of  $\text{ZnS(Ag)}$  that covers the internal surface of the cells is detected. The pulse spectrum obtained using scintillation cells is a continuous spectrum and it is not possible to correlate events with energies of alpha particles; therefore this system consists of a counter that records the overall number of counts in the selected time interval and it is not possible to have a continuous check of the good correlation between counting rate and  $^{222}\text{Rn}$  concentration.





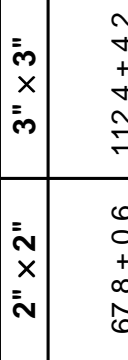
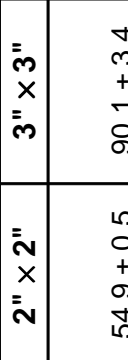
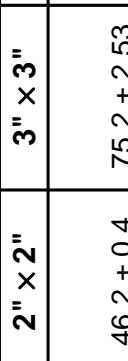
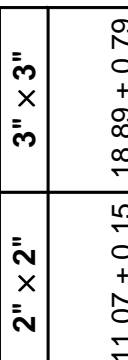
The system proposed in this work is based on the detection of the most abundant gamma radiations emitted by  $^{214}\text{Pb}$  (main energies 242, 295 and 352 keV) and  $^{214}\text{Bi}$  (main energy 609 keV). During the monitoring of  $^{222}\text{Rn}$  concentration, the analysis of the spectrum of each measure allows to check the reliability of the collected data. Upon the spectrum it is possible to integrate counts over different ROIs (Region Of Interest). Table I shows a comparison between two  $\text{NaI(Tl)}$  scintillators, respectively  $2'' \times 2''$  and  $3'' \times 3''$ , for different ROIs shown above each column: it is remarkable how the  $S/\sqrt{B}$  ratio (S: overall counts, B: background counts) is nearly the same for a given ROI, while MDA (Minimum Detectable Activity) is resulted about 2 Bq/l for the  $3'' \times 3''$  scintillator and comprised between 4 Bq/l and 5 Bq/l for the  $2'' \times 2''$  one when a 15 min counting time is concerned [9].

Since the system realized is appointed to monitor  $^{222}\text{Rn}$  concentration of the order of one hundred Bq/l we have chosen to work with the  $2'' \times 2''$  scintillator due to its smaller dimension and lower price. Through an usual counting chain, equipped with a preamplifier and an amplifier, the detector is connected to a multichannel analyzer. The shield needed to reduce the background contribute consists of lead marbles, which allows an easy carrying. Lead thickness is  $\geq 50 \text{ g/cm}^2$ .

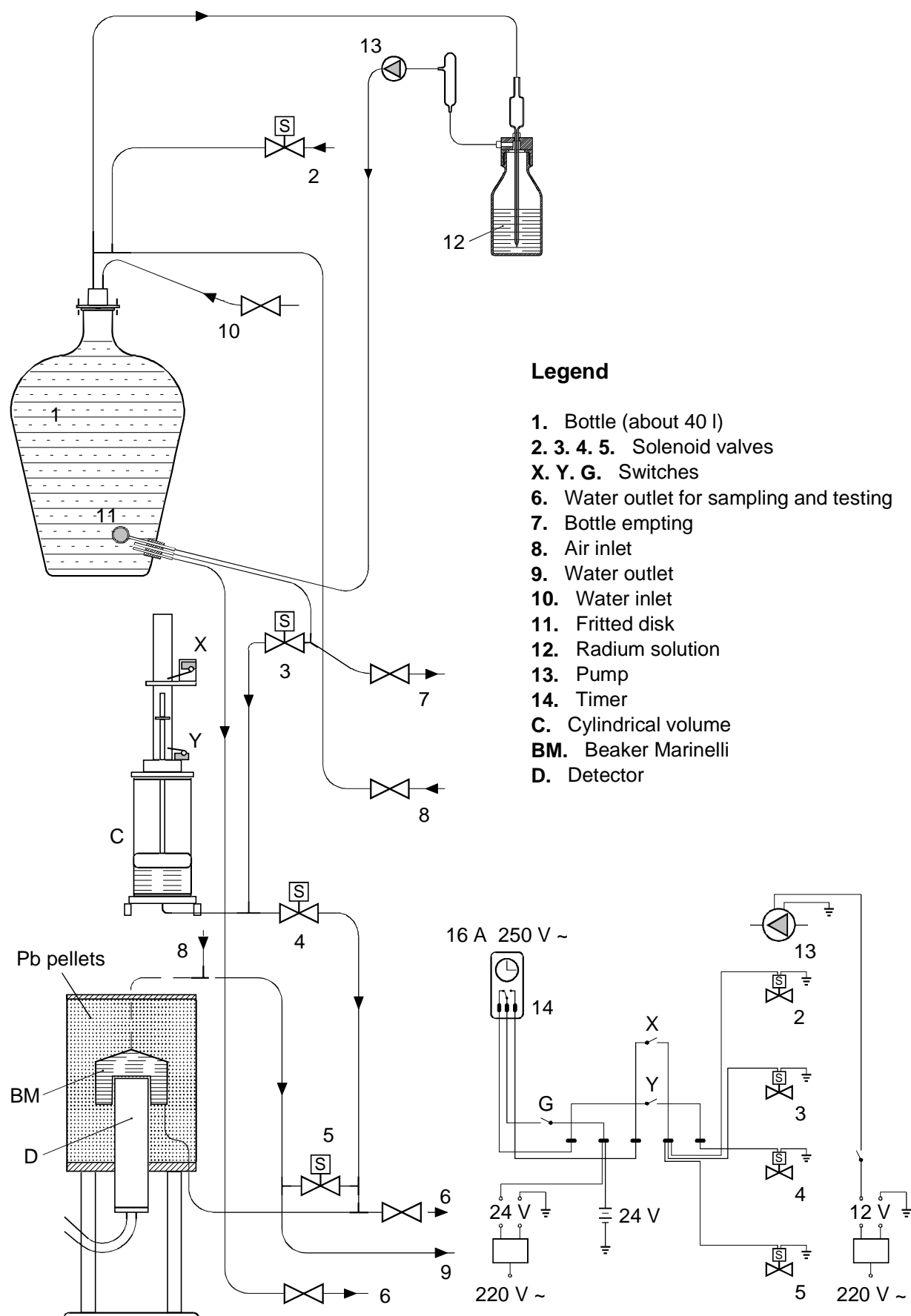
Measures can be performed continuously with a constant water flow through the beaker Marinelli. In this case it is necessary to provide a tank of sufficient volume between the well and the system so as to ensure the establishment of radioactive equilibrium between  $^{222}\text{Rn}$  and its short-lived daughters before the measure, i.e. at least 3 hrs. This operation mode needs a continuous working of the well pumps and involves a large consume of water, not always acceptable. Due to this consideration and because of the characteristic times of the phenomena investigated, we have chosen to do one measure each four hours, with a 15' counting three hours and a half after the water sample has been taken.

### Laboratory tests

Before setting up the system by the well, some laboratory tests were carried out using the facility shown in fig. 1, where a 40 l bottle simulates the water spring. The bottle is filled through the valve 10. Pump 13 is switched on for about 30 minutes and leads to a recirculation of the residual air, which bubbles in the bottle and in a flask partially filled with a  $\text{RaCl}_2$  solution.  $^{222}\text{Rn}$  extracted from solution is partially transferred to the water in the bottle. Using a 30 kBq source we have obtained a  $^{222}\text{Rn}$  concentration in water of about 300 Bq/l at normal pressure and temperature.

	Region Of Interest							
								
	2" × 2"	3" × 3"	2" × 2"	3" × 3"	2" × 2"	3" × 3"	2" × 2"	3" × 3"
Counting efficiency (count/Bq)	67.8 ± 0.6	112.4 ± 4.2	54.9 ± 0.5	90.1 ± 3.4	46.2 ± 0.4	75.2 ± 2.53	11.07 ± 0.15	18.89 ± 0.79
Signal to Noise Ratio	228.5 ± 1.1	245.3 ± 2.7	202.6 ± 1.1	218.7 ± 2.7	223.1 ± 1.2	249.3 ± 4.5	97.5 ± 1.2	114.0 ± 3.2
LLD (count/min)	13.05 ± 0.01	14.42 ± 0.10	11.92 ± 0.01	12.97 ± 0.10	9.11 ± 0.01	9.50 ± 0.10	5.00 ± 0.02	5.22 ± 0.10
MDA (Bq/l)	4.19 ± 0.04	2.03 ± 0.08	4.72 ± 0.04	2.27 ± 0.09	4.29 ± 0.04	1.99 ± 0.07	9.81 ± 0.14	4.36 ± 0.20

**Table I :** A comparison between 2"×2" and 3"×3" NaI(Tl) scintillators used in a low background  $\gamma$ -ray spectrometer.



**Figure 1 :** Hydraulic and electrical schemes of the laboratory test facility.

According to the electrical scheme shown in fig. 1, a timer controls the solenoid valves 2, 3, 4 and 5. Valves 2, 3 and 5 are operated in parallel: the first one allows the filling up of the cylinder C, provided with a floating piston. A connecting rod moves jointly with the piston and actuates two switches X and Y, respectively when the cylinder is full and empty. Valve 2 lets the air enter the bottle during the transfer phase. Each complete cycle lasts 4 hrs. At the beginning, the timer changes over for 15' actuating valves 2, 3 and 5 until the floating piston reaches within a few minutes the switch X which stops the water flow. Valve 5 allows the emptying of the beaker Marinelli which contains the water analyzed in the previous measure. When the first 15' have elapsed, the timer changes over opening the valve 4 which allows the emptying of cylinder C through the beaker. The cylinder volume is about triple with respect to the beaker volume (0.7 l) to ensure that the water to be measured has not come in contact with air.

At the end of the water transfer the switch Y de-excites valve 4. About 3 h and 15' later the MCA starts counting for 15' and stops before the next cycle starts.

<sup>222</sup>Rn concentration behaviour relative to data collected over a 14 days' test is shown in fig. 2. The first region refers to water remained in the airtight bottle for almost a month and data collected can be regarded as background. The next region is subsequent to an enrichment cycle.

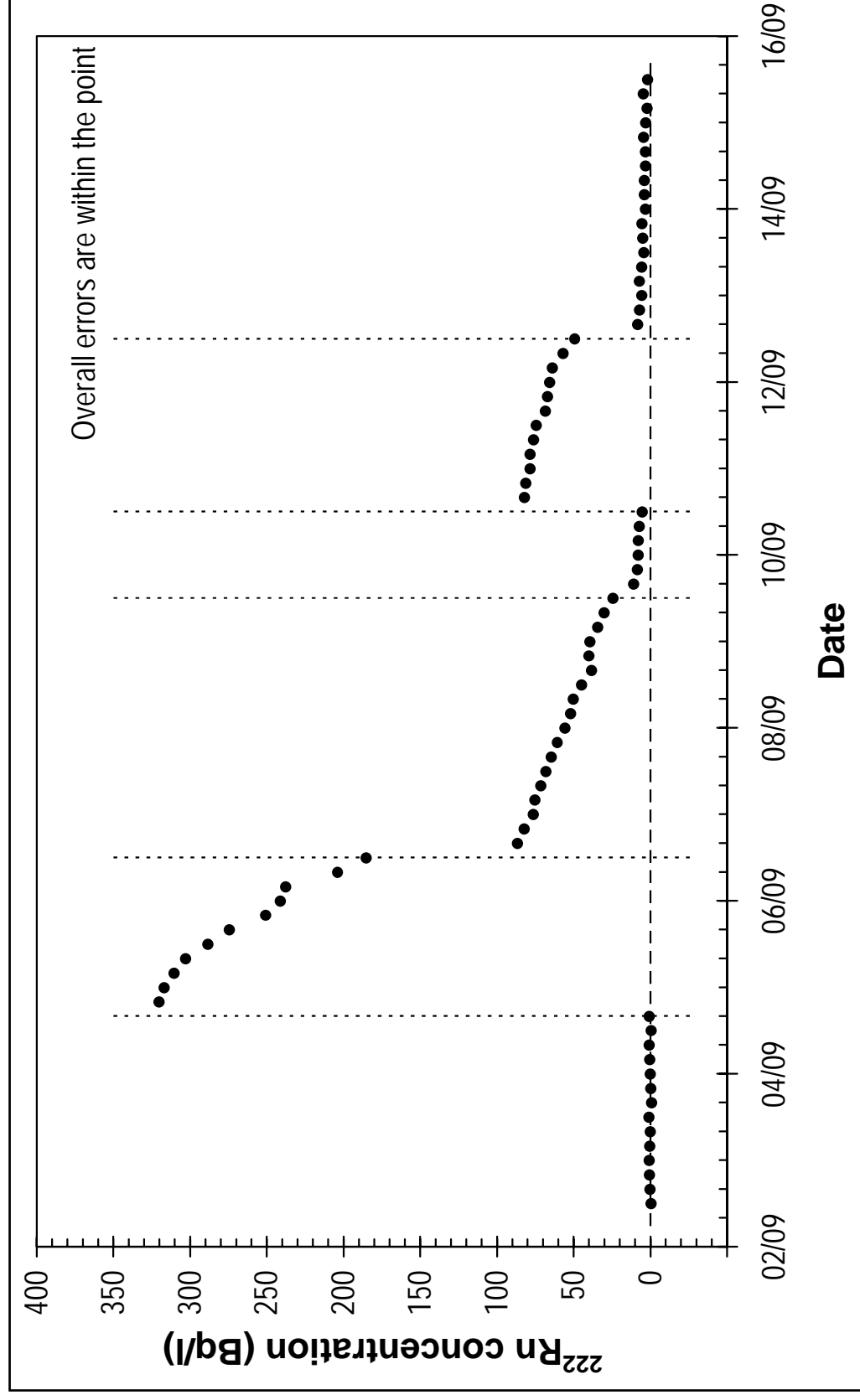
After 44 h we added mineral water to dilute the enriched water in the bottle. After a further dilution, on 10/9 at 12.00 we proceeded to a smaller enrichment.

The test has been concluded emptying completely and filling again the bottle with water from municipal aqueduct.

The system stability has been verified comparing spectra from a three days' test.

## **Conclusions**

Within 1997 the system, limitedly to spectrometer, will be installed by a well in Frascati. The well pump will be run for a few minutes at the beginning of each cycle and water will flow through the beaker Marinelli providing a complete renewal. The realized facility will be used for tests with other systems in progress.



**Figure 2 :** Response versus time to variations in  $^{222}\text{Rn}$  concentration.

## Bibliography

- [1] Countess R. J. in *Measurement of  $^{222}\text{Rn}$  in water*. Health Physics, **34** (1978).
- [2] De Luca A. and Mancini C. in *The measurement system for  $^{222}\text{Rn}$  monitoring with charcoal adsorption collectors*. Health Physics, **61** (1991).
- [3] Igarashi G. et al. in *Ground-water radon anomaly before the Kobe earthquake in Japan*. Science, **269** (1995).
- [4] Friedmann H. and Hernegger F. in *A method for continuous measurement of radon in water of spring for earthquake prediction*. Geoph. Res. Lett., **5**, **7** (1978).
- [5] Friedmann H. in *Anomalies in the radon content of spring water as earthquake precursors phenomena*. Earth. Pred. Res., **1** (1985).
- [6] Hauksson E. in *Radon content of groundwater as an earthquake precursor: evaluation of worldwide data and physical basis*. Journ. Geoph. Res., **86** (1981).
- [7] Igarashi G., Tohjima Y. and Wakita H. in *Time-variable response characteristics of groundwater radon to earthquakes*. Geoph. Res. Lett., **20**, **17** (1993).
- [8] Lucas H. F. in *Improved low level alpha scintillation counter for radon*. Rev. Sci. Instr., **28** (1957) 680.
- [9] Bernardini L. *Misura in continuo della concentrazione di radon in acqua*. Degree thesis. Department of Nuclear Engineering and Conversion of Energy, University of Rome “La Sapienza”, 1997.

## **Allegato D.**

### **Ripartizione del radon in un contenitore in cui siano presenti le fasi liquida e aeriforme**

#### **D.1. Trattazione analitica**

Supponiamo di aver iniettato un'attività  $A_{Tot}$  di radon dispersa in un volume di aria  $V_{aria}$  ricca di radon all'interno di un contenitore in cui sono presenti sia aria (volume  $V_{aria}$  iniziale) che acqua (volume  $V_{acqua}$ ) e di far gorgogliare l'aria attraverso il liquido per un tempo sufficientemente lungo in ricircolo in circuito chiuso. Si supponga inoltre il sistema aria - acqua in equilibrio termico e alla pressione atmosferica<sup>1</sup>.

Il radon si ripartisce fra le due fasi; se indichiamo con  $C_{acqua}$  e  $C_{aria}$  le concentrazioni di radon in acqua e in aria, si definisce il coefficiente di solubilità  $C_S$  come:

$$C_S = \frac{C_{acqua}}{C_{aria}} \quad (D.1)$$

Analogamente a quanto avviene a tutti i gas disciolti in un liquido, al diminuire della temperatura la solubilità del radon in acqua aumenta; il coefficiente di solubilità aumenta fino ad assumere a 0 °C il suo valore massimo pari a circa 0.5. Inoltre al crescere della pressione la solubilità del gas nel liquido aumenta.

La tabella D.1 riporta il coefficiente di solubilità a pressione atmosferica in acqua in funzione della temperatura; l'interpolazione di tale andamento, espresso dalla

$$C_S = 9.2 \cdot 10^{-8} T^4 - 1.2386 \cdot 10^{-5} T^3 + 6.9072 \cdot 10^{-4} T^2 + 0.022453 T + 0.50699 \quad (D.2)$$

è graficata in figura D.1.

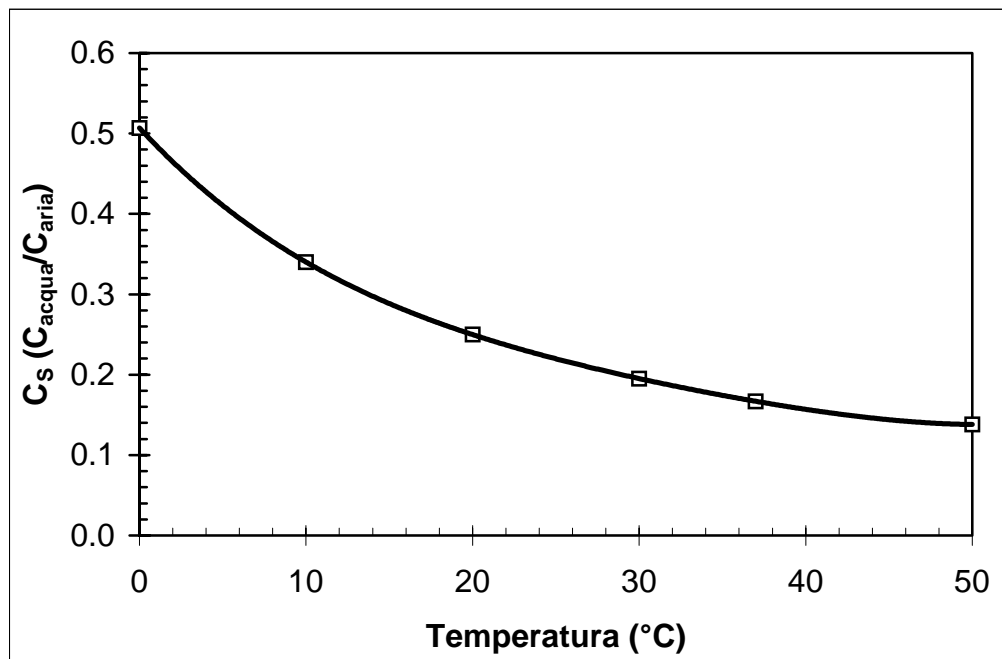
---

<sup>1</sup> Per far sì che l'iniezione di radon non alteri la pressione all'interno del contenitore è sufficiente che in corrispondenza della sua estremità superiore vi sia una sacca di gomma da svuotare preventivamente per un volume corrispondente a quello dell'iniezione stessa.



Temperatura (°C)	Coefficiente di solubilità
0	0.507
10	0.340
20	0.250
30	0.195
37	0.167
50	0.138
75	0.114
100	0.106

**Tabella D.1** - Coefficiente di solubilità del radon in acqua a pressione atmosferica in funzione della temperatura



**Figura D.1** - Coefficiente di solubilità del radon in acqua a pressione atmosferica in funzione della temperatura

Avendo introdotto il parametro  $C_s$  si può procedere al calcolo della concentrazione nell'aria e nell'acqua del contenitore per l'arricchimento. Per l'attività totale iniettata vale ovviamente la relazione

$$A_{\text{Tot}} = A_{\text{acqua}} + A_{\text{aria}} \quad (\text{D.3})$$

Indicando con  $V_{\text{Tot}}$  il volume totale del contenitore e con  $C_{\text{acqua}}$  e  $C_{\text{aria}}$  le concentrazioni di radon in acqua e aria, le corrispondenti attività sono date da

$$A_{\text{acqua}} = C_{\text{acqua}} \cdot V_{\text{acqua}} \quad (\text{D.4})$$

$$A_{\text{aria}} = C_{\text{aria}} \cdot V_{\text{aria}} = C_{\text{aria}} \cdot (V_{\text{Tot}} - V_{\text{acqua}}) = \frac{C_{\text{acqua}}}{C_S} \cdot (V_{\text{Tot}} - V_{\text{acqua}}) \quad (\text{D.5})$$

essendo  $V_{\text{aria}} = V_{\text{aria iniziale}} + V_{\text{aria ricca di radon}}$ , l'attività totale vale quindi

$$A_{\text{Tot}} = C_{\text{acqua}} \cdot V_{\text{acqua}} + \frac{C_{\text{acqua}}}{C_S} \cdot (V_{\text{Tot}} - V_{\text{acqua}}) \quad (\text{D.6})$$

da cui si ottiene

$$C_{\text{acqua}} = \frac{A_{\text{Tot}}}{V_{\text{acqua}} + \frac{V_{\text{Tot}} - V_{\text{acqua}}}{C_S}} = \frac{C_S \cdot A_{\text{Tot}}}{V_{\text{Tot}} + (C_S - 1) \cdot V_{\text{acqua}}} \quad (\text{D.7})$$

e, per la (D.1),

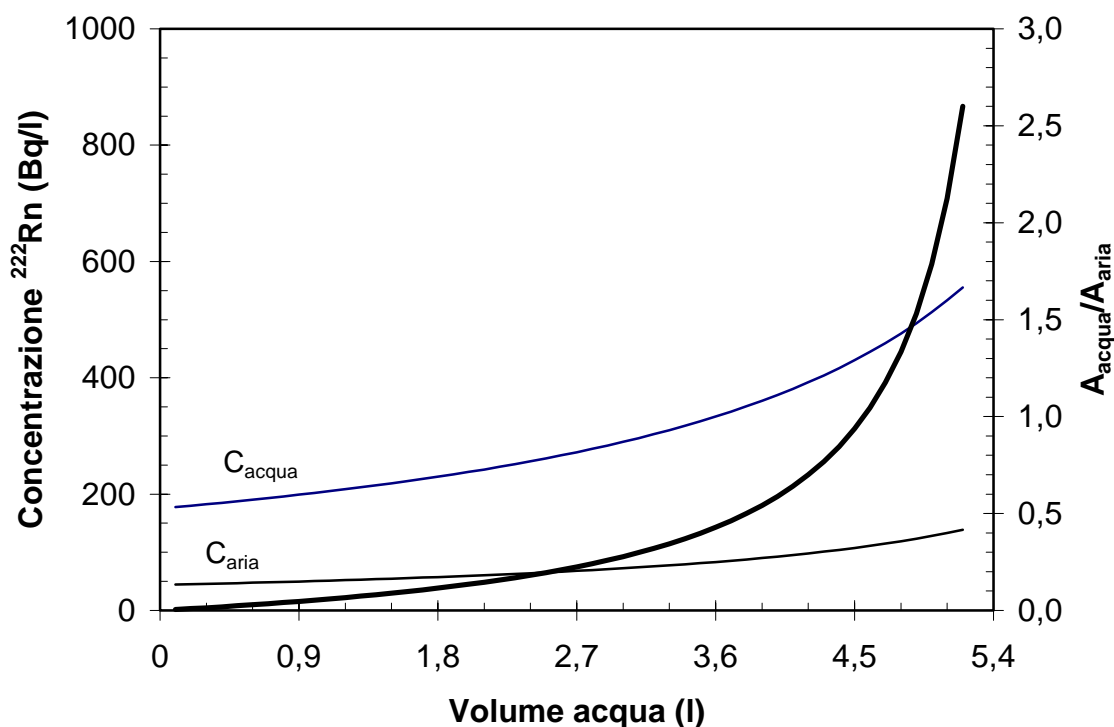
$$C_{\text{aria}} = \frac{C_{\text{acqua}}}{C_S} = \frac{A_{\text{Tot}}}{V_{\text{Tot}} + (C_S - 1) \cdot V_{\text{acqua}}} \quad (\text{D.8})$$

dalle (D.1), (D.4) e (D.5) si ottiene infine

$$\frac{A_{\text{acqua}}}{A_{\text{aria}}} = \frac{C_{\text{acqua}} \cdot V_{\text{acqua}}}{C_{\text{aria}} \cdot V_{\text{aria}}} = C_S \cdot \frac{V_{\text{acqua}}}{V_{\text{Tot}} - V_{\text{acqua}}} \quad (\text{D.9})$$

che dà immediatamente la ripartizione delle attività nel contenitore tra la fase liquida e aeriforme in funzione del coefficiente di solubilità e del volume di liquido, essendo noto il volume  $V_{Tot}$ .

In figura D.2 sono mostrati gli andamenti in linea sottile delle (D.7), (D.8) e, in linea spessa, della (D.9) avendo assunto  $V_{Tot} = 5.7$  l,  $A_{Tot} = 1000$  Bq e  $C_S$  ( $T = 20$  °C,  $p = 1$  atm)  $= 0.25$



**Figura D.2** - Andamenti indicativi della ripartizione di un'attività di 1000 Bq di radon nelle fasi liquida e aeriforme in un contenitore del volume di 5.7 l. (Il sistema si suppone in equilibrio a  $T = 20$  °C e  $p = 1$  atm)

È quindi evidente che l'arricchimento di un volume di acqua mediante ricircolo in circuito chiuso di radon disperso in un volume di aria è tanto più efficace quanto più si massimizza il rapporto  $V_{acqua}/V_{aria}$ . Inoltre, il prelievo di un campione di acqua così arricchita deve avvenire in modo da minimizzarne il contatto con l'aria: ecco perché il riempimento di un beaker Marinelli o della bottiglia utilizzata dall'unità di degassamento portatile avvengono sempre dal fondo.

## **Allegato E**

### **Confronto tra tre metodologie di misura della concentrazione di radon in acqua**

*G. Galli, C. Mancini* Dipartimento di Ingegneria Nucleare e Conversioni di Energia, Università di Roma “La Sapienza”

*A. Ianni, S. Sandri, R. Vasselli* ENEA AMB-PRO-IRP, Laboratorio di Radioprotezione del Centro Ricerca di Frascati

*Bollettino AIRP n. 148, Gennaio-Febbraio 1999*

#### **Riassunto**

Nella misura della concentrazione del gas radon disciolto nell'acqua di un pozzo situato nel Comune di Frascati sono messi a confronto tre diversi metodi: scintillazione liquida, Beaker Marinelli su scintillatore e carboni attivi.

I prelievi sono effettuati contestualmente per le tre misurazioni ed in ogni campagna di raccolta si prelevano otto campioni d'acqua per ogni sistema di misura.

Nel lavoro i risultati ottenuti con i tre metodi sono messi a confronto ed il buon accordo finale è brevemente discusso.

#### **Abstract**

In measuring the radon gas concentration in the water of a well located in the Comune di Frascati area three different methods are compared: liquid scintillation counting,

Marinelli Beaker with scintillation counting and active charcoal filters.

The water samples are collected simultaneously for the three systems and for each collection campaign a total of eight samples per system are collected.

In the paper the results obtained with the three methods are compared and the good final agreement is shortly discussed.

## **Introduzione**

I Castelli Romani sono noti per la loro sismicità e dispongono di abbondanti falde acquifere profonde da cui viene attinta acqua da un considerevole numero di pozzi sia per uso irriguo che industriale e domestico.

Si tratta quindi di una località che ben si presta per stabilire eventuali correlazioni tra eventi sismici e variazioni di concentrazione di radon in acqua di falda.

È in fase di installazione in prossimità della bocca del pozzo sito nei Laboratori Nazionali di Frascati un sistema per misure in modo “quasi continuo”, cioè il campionamento e la misura di concentrazione di radon con memorizzazione dei dati avverranno in modo automatico ogni sei ore. Tale sistema è costituito da un Beaker Marinelli da 0.6 l accoppiato ad uno scintillatore a NaI(Tl) da 2"×2" per la rivelazione dei gamma emessi dal  $^{214}\text{Pb}$  e  $^{214}\text{Bi}$ , figli a breve tempo di dimezzamento del  $^{222}\text{Rn}$ . Al fine di caratterizzare le acque del pozzo sono state eseguite alcune misure di screening nell'arco di vari mesi. In tale fase si è proceduto anche al confronto dei metodi che verranno impiegati sia in indagini di screening in altri pozzi siti sempre nei Castelli Romani sia per il controllo saltuario del corretto funzionamento del sistema di misura in continuo che verrà tenuto ininterrottamente in funzione almeno per un intero anno.

## **Materiali e metodi**

Le tecniche messe a confronto sono: la scintillazione liquida, i collettori a carboni attivi ed i Beaker Marinelli.

La scintillazione liquida si basa sull'uso di liquidi sensibili composti da soluti fluorescenti miscelati con solventi organici. Per la rivelazione tali liquidi attivi sono

miscelati con la matrice contenente la sorgente radioattiva e nell'interazione con la radiazione ionizzante emettono luce che viene captata e misurata attraverso fototubi collegati ad opportuni sistemi elettronici.

Il processo di determinazione della concentrazione di radon in acqua con tale metodo è impiegato presso il laboratorio dell'Istituto per la Radioprotezione (IRP) di Frascati da alcuni anni dove è stato sviluppato modificando una metodica proposta dall'EPA statunitense [1]. Il procedimento adottato si compone di due fasi principali; la raccolta del campione acquoso e il conteggio del campione miscelato con liquido scintillante.

Per la raccolta del campione si impiega una normale siringa, solitamente in materiale plastico, con caratteristiche di tenuta non particolari, ma comunque accettabili in considerazione dei brevi tempi di raccolta e trasferimento. L'acqua viene prelevata accoppiando un tubo in polietilene alla bocca del rubinetto di uscita dopo averla fatta scorrere per almeno due minuti, anche per rimuovere il liquido stagnante nelle tubature, ed avendo cura che il tubo si riempia in modo uniforme. Nel caso specifico il tempo di attesa è stato maggiore a causa della profondità del pozzo e della necessità di raggiungere stabilità nel flusso d'acqua. L'ago deve essere inserito nel tubo in corrispondenza ad una zona del tubo in cui l'acqua riempie completamente l'interno e gli effetti di turbolenza sono praticamente nulli.

Durante l'estrazione dell'acqua bisogna porre attenzione a non introdurre aria nella siringa. Per limitare questo inconveniente si effettua un primo prelievo, quindi si estrae l'ago dal tubo e lo si inserisce nuovamente, dopo aver espulso l'aria contenuta nella siringa, mantenendo parte dell'acqua prelevata ed effettuando il prelievo completo.

In ogni campionamento sono raccolti 10 ml d'acqua che sono poi trasferiti nella fiala di conteggio già predisposta con 10 ml di liquido scintillante.

La misura avviene solitamente almeno quattro ore dopo il prelievo per consentire il raggiungimento di un sufficiente equilibrio tra il radon ed i suoi figli a breve vita media.

La fiala usata per i conteggi è la Zinsser SLD in polietilene con superfici interne ricoperte in teflon.

La tenuta di questa è particolarmente adeguata come risulta da precedenti analisi documentate [2]. Il liquido di scintillazione impiegato è il NEF 957 dalla New English Nuclear che presenta peculiari caratteristiche nella discriminazione d'impulso tra alfa e beta, buona risoluzione e riduzione dell'interferenza di altri radionuclidi. Il contatore impiegato è il 1414 Guardian della Wallac, nella modalità di discriminazione degli impulsi

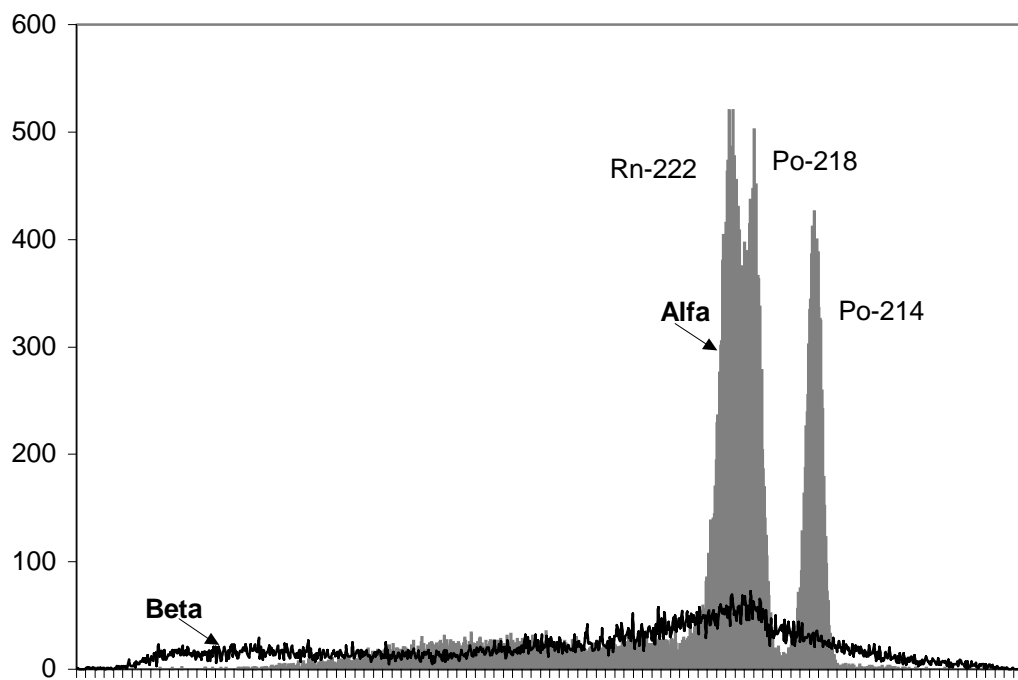
alfa/beta.

La taratura del sistema di conteggio è stata effettuata con una sorgente calibrata di  $^{226}\text{Ra}$ , preparata dall'Istituto di Metrologia delle Radiazioni dell'ENEA.

Il sistema di misura, nella configurazione adottata e con le procedure impiegate, presenta le seguenti caratteristiche principali nella determinazione della concentrazione del radon in acqua:

Tempo di conteggio	<b><i>15 min</i></b>
Fondo (finestra 400 ÷ 900)	<b><i>0.58 cpm</i></b>
Scarto tipo sperimentale (fondo)	<b><i>0.24 cpm</i></b>
Fattore di taratura	<b><i>(278.15 ± 0.51) %</i></b>
Figura di merito	<b><i>133392</i></b>
Minima Attività Rivelabile	<b><i>0.67 Bq/l</i></b>

Il tipico spettro, separato nelle componenti alfa e beta, ottenuto nella misura con sorgente campione  $^{226}\text{Ra}$  con il sistema Guardian è riportato in figura 1. Nello spettro alfa sono evidenziati i tre picchi utilizzati per la determinazione della concentrazione di radon. Il picco del  $^{226}\text{Ra}$  non viene rivelato a causa del particolare liquido scintillante impiegato che estrae il solo radon dall'acqua, lasciando il radio in soluzione. Analogo spettro si ottiene nelle misure reali effettuate su campioni incogniti. L'attività di  $^{222}\text{Rn}$  si ottiene prendendo i conteggi netti nei tre picchi alfa considerati ed applicando a tale valore il fattore di taratura ottenuto con la sorgente di calibrazione.



**Serie del  $^{226}\text{Ra}$**

Isotopi	$^{226}\text{Ra}$	$^{222}\text{Rn}$	$^{218}\text{Po}$	$^{214}\text{Pb}$	$^{214}\text{Bi}$	$^{214}\text{Po}$	$^{210}\text{Pb}$
$T_{1/2}$	$1.6 \times 10^3 \text{ y}$	3.823 d	3.05 min	26.8 min	19.9 min	0.2 ms	22.26 y
$E_{\alpha} \text{ (MeV)}$	4.78	5.89	6.00	-	-	7.69	-

**Figura 1** - Tipico spettro ottenuto attraverso la discriminazione degli impulsi  $\alpha$  e  $\beta$  con il contatore Guardian e il liquido NEF (sorgente  $^{226}\text{Ra}$ )

I collettori a carboni attivi sono usualmente impiegati per la misura della concentrazione di radon in aria. La tecnica messa a punto nel DINCE (Dipartimento di Ingegneria Nucleare e Conversioni di Energia) consiste in un sistema che consente il trasferimento completo del radon dall'acqua ai carboni attivi.

Il prelievo è eseguito con una bottiglia da 0.6 l che viene successivamente posta in un circuito chiuso: una pompa a membrana invia l'aria contenuta nel circuito sul fondo della bottiglia dove per gorgogliamento è asportato il radon in soluzione; l'aria ricca di radon transita quindi nei carboni attivi di un collettore dello stesso tipo utilizzato per le misure di concentrazione di radon in aria. Dopo un ricircolo di almeno due minuti è completato il



trasferimento del radon nei carboni attivi.

Dopo almeno una ventina di ore, necessarie non solo per il raggiungimento dell'equilibrio tra  $^{222}\text{Rn}$  e figli a breve tempo di dimezzamento, ma anche per raggiungere l'uniforme distribuzione del radon adsorbito nei carboni, il collettore è posto in conteggio in uno spettrometro gamma dotato di rivelatore a NaI(Tl) da 3"×3". Vengono rivelate le radiazioni gamma emesse dal  $^{214}\text{Pb}$  (242, 295, 352 keV) e dal  $^{214}\text{Bi}$  (609 keV).

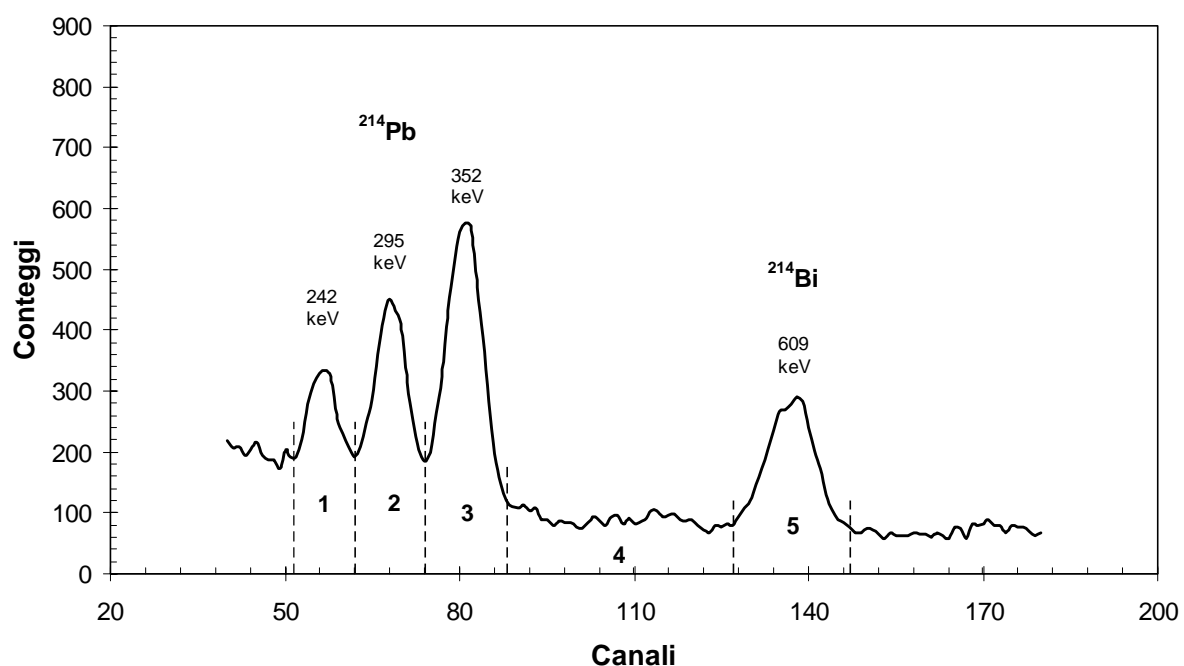
La relazione che consente di determinare la concentrazione di radon è la seguente:

$$C_{\text{Rn}} = \frac{C}{DF \cdot F \cdot E \cdot 0.6} \text{ Bq/l}$$

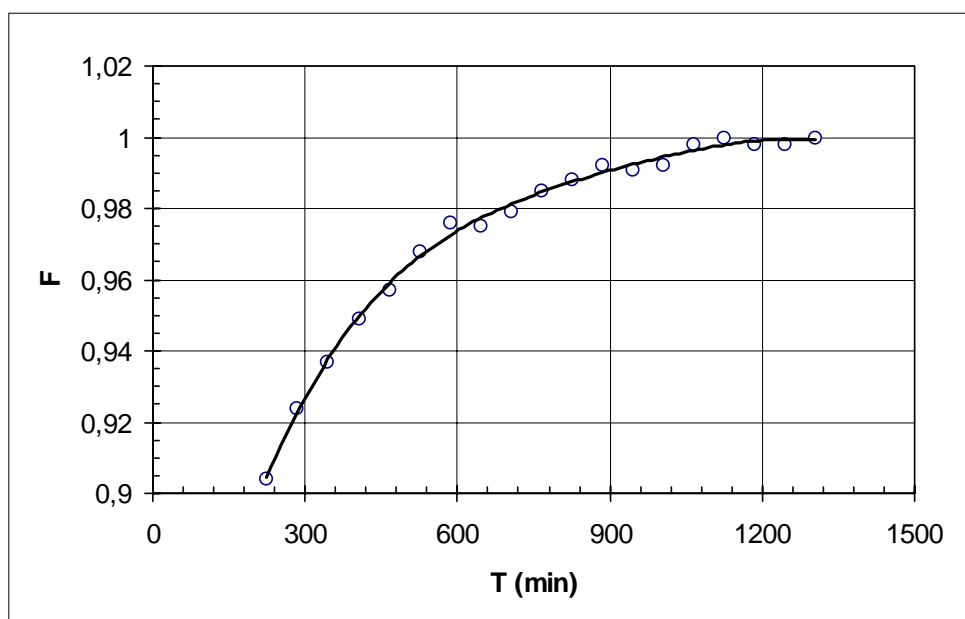
ove  $C$  sono i conteggi netti ottenuti in un prefissato intervallo di tempo sulle ROI relative alle righe gamma suddette (in figura 2 è mostrato un tipico spettro con rimarcate le ROI utilizzate nelle misure riportate nel seguito);  $DF$  è un fattore correttivo che tiene conto del decadimento del  $^{222}\text{Rn}$  nel tempo trascorso tra prelievo e misura ;  $0.6$  è il volume in litri della bottiglia ;  $F$  è un fattore che è pari ad 1 se il tempo trascorso tra prelievo e misura è superiore alle 24 ore oppure assume i valori deducibili dalla curva in figura 3 per tempi di attesa inferiori ;  $E$  è l'efficienza ( $\text{Bq}^{-1}$ ) del sistema di rivelazione ottenuta, sulle stesse ROI e nello stesso tempo di misura utilizzati per  $C$ , tramite un collettore contenente un'attività nota e certificata di  $^{226}\text{Ra}$  in equilibrio con il  $^{222}\text{Rn}$  ed i suoi figli a breve tempo di dimezzamento.

Il sistema può utilizzare sia collettori da 10 cm conformi allo standard dell'EPA sia collettori da 6 cm sviluppati nel DINCE ed illustrati in figura 4: a parità di radon adsorbito questi ultimi sono più efficienti di circa il 30%. Comunque si scelgano le combinazioni delle ROI indicate da 1 a 5 in figura 2 il fattore di conversione tra il collettore a carbone attivo EPA e quello DINCE ( $\text{Eff}_{\text{DINCE}}/\text{Eff}_{\text{EPA}}$ ) vale circa 1.28. Le combinazioni esaminate sono riportate in tabella 1. La regione della ROI n. 4, che in figura 2 appare relativa al solo fondo, viene considerata per tenere conto delle eventuali derive conseguenti a misure condotte per tempi prolungati, nel qual caso per semplicità viene considerata la regione composta da tutte e cinque le ROI. La figura di merito  $S/\sqrt{B}$  è il rapporto tra il conteggio netto  $S$  e la radice quadrata del fondo  $B$ ; i dati in tabella sono normalizzati alla figura di merito della combinazione migliore assunta come unitaria. Nelle misure condotte nei LNF

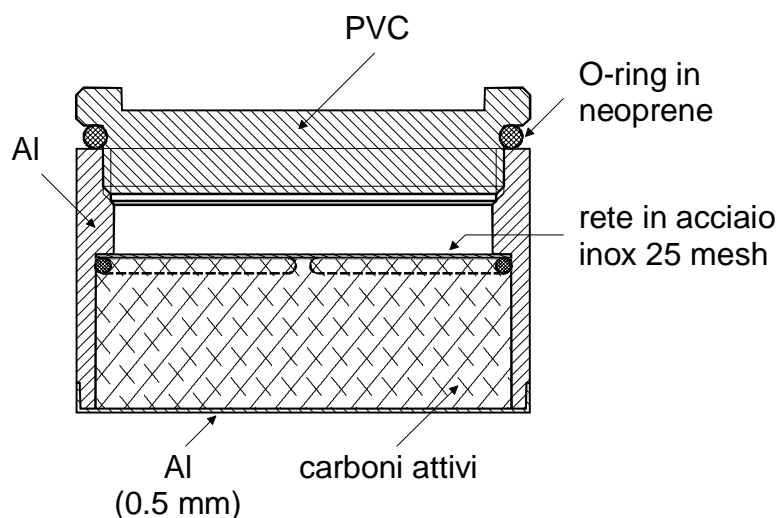
sono stati usati collettori DINCE e la combinazione di ROI 2+3+5. L'efficienza  $E$  è di  $(128.0 \pm 2.8) \text{ Bq}^{-1}$ .



**Figura 2** - Spettro  $\gamma$  acquisito con uno scintillatore 3'' $\times$ 3'' a NaI(Tl) relativo ai figli del radon. Le regioni di interesse (ROI) per la spettrometria  $\gamma$  sono delimitate dalle linee tratteggiate. I conteggi considerati sono al netto del fondo, valutato con un'acquisizione indipendente.



**Figura 3** - Curva  $F$  di correzione per collettori da 6 cm messi in conteggio a meno di 24 ore dal degassamento, ottenuta sperimentalmente dagli autori



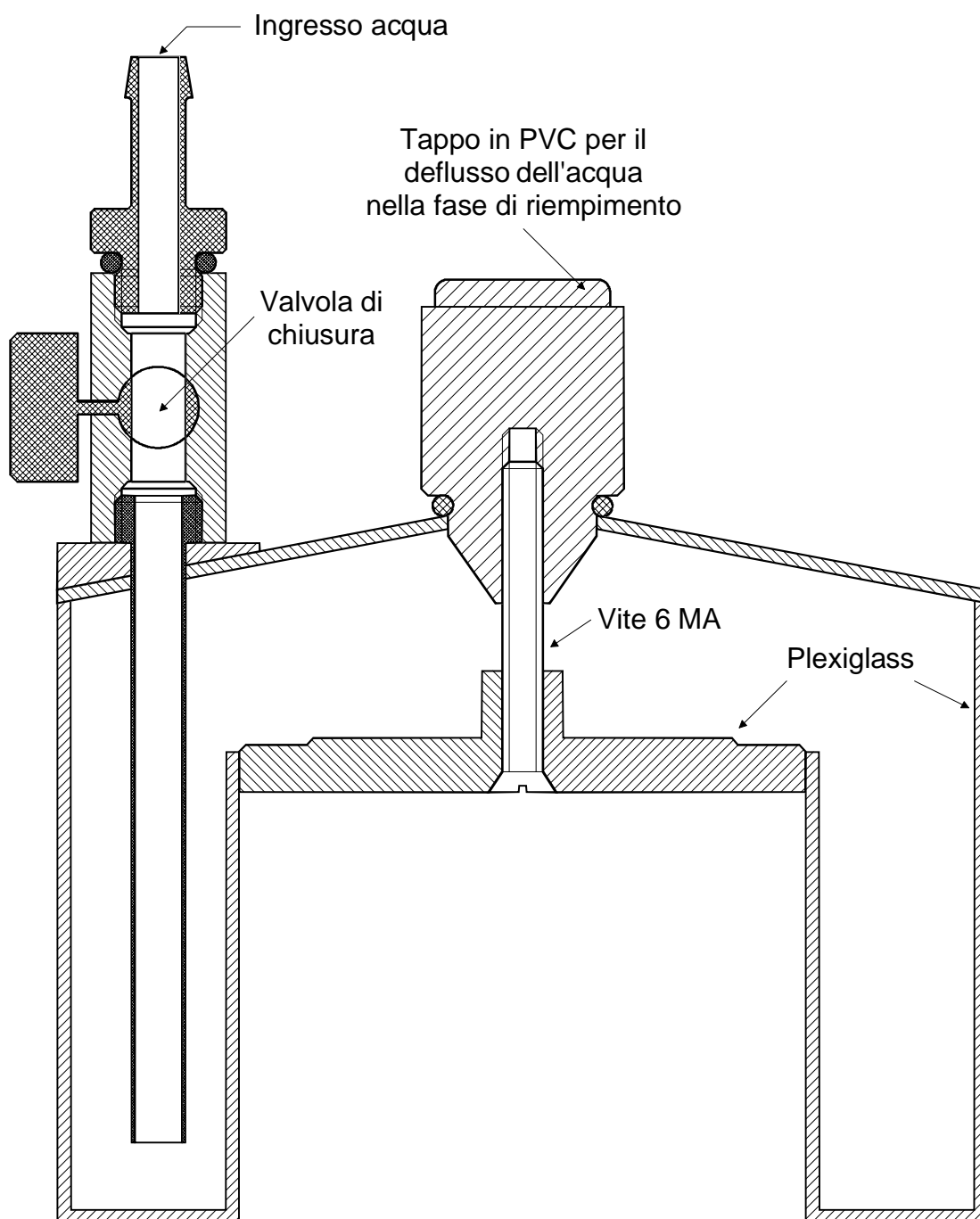
**Figura 4** - Collettori DINCE ( $\phi 6$  cm)

<b>Regione di interesse (ROI)</b>	<b><math>S/\sqrt{B}</math></b>	<b><math>\text{Eff}_{\text{DINCE}}/\text{Eff}_{\text{EPA}}</math></b>
1 + 2 + 3 + 5	1	$1.29 \pm 0.01$
2 + 3 + 5	0.95	$1.29 \pm 0.01$
1 + 2 + 3 + 4 + 5	0.88	$1.28 \pm 0.01$
2 + 3 + 4 + 5	0.81	$1.28 \pm 0.01$

**Tabella 1** - Figure di merito normalizzate e rapporti di efficienza dei collettori DINCE ed EPA per varie ROI

I Beaker Marinelli utilizzati sono realizzati in polistirene e plexiglass (figura 5). Il volume è di 0.95 l. L'acqua di riempimento entra con il condotto che penetra fin quasi al fondo del beaker e defluisce dal foro posto al centro del coperchio conico. Dopo il tempo necessario per il transito di un volume d'acqua pari almeno al doppio del volume del beaker viene chiuso il rubinetto d'ingresso e serrato il pomello all'uscita dotato di O-ring.

Dopo il tempo necessario perché si stabilisca l'equilibrio tra radon e figli a breve tempo di dimezzamento (almeno tre ore) si procede al conteggio in spettrometro gamma dotato di NaI(Tl) da  $3'' \times 3''$ .



**Figura 5** - Beaker Marinelli (0.95 l)

La concentrazione di radon è data dalla relazione seguente:

$$C_{Rn} = \frac{C}{DF \cdot E \cdot 0.95} \text{ Bq/l}$$

ove  $C$  sono i conteggi netti ottenuti in un prefissato intervallo di tempo sulle ROI relative alle principali righe gamma emesse da  $^{214}\text{Pb}$  e  $^{214}\text{Bi}$ ;  $DF$  è il fattore correttivo che tiene conto del decadimento del radon;  $E$  è l'efficienza dello spettrometro inizialmente ottenuta con un Beaker Marinelli contenente una soluzione acida ( $\text{pH} = 2$ ) a concentrazione nota di  $^{226}\text{Ra}$  in equilibrio con il  $^{222}\text{Rn}$  ed i figli a breve tempo di dimezzamento. Il valore di  $E$  per le ROI di figura 2 è riportato in tabella 2.

Regione di interesse (ROI)	$S/\sqrt{B}$	$C_{\text{BM}}/C_{\text{collettori}}$	$\text{Eff}_{\text{BM}}$ (Conteggi/Bq)
1 + 2 + 3 + 5	1	$0.77 \pm 0.01$	$93 \pm 2$
2 + 3 + 5	0.92	$0.73 \pm 0.01$	$73 \pm 2$
1 + 2 + 3 + 4 + 5	0.92	$0.78 \pm 0.01$	$107 \pm 2$
2 + 3 + 4 + 5	0.82	$0.75 \pm 0.01$	$87 \pm 2$

**Tabella 2** - Figure di merito normalizzate, rapporti  $C_{\text{BM}}/C_{\text{collettori}}$  ed efficienze dei Beaker Marinelli (BM) da 0.95 l per varie ROI

## Risultati ottenuti

Sono stati effettuati due cicli di misura il 10/03/98 ed il 28/04/98. In ogni ciclo i campionamenti sono avvenuti con prelievo in parallelo per le tre tecniche.

Il pozzo è stato messo in funzione almeno 20 min prima dell'inizio dei prelievi e tenuto permanentemente in funzione fino alla fine. I risultati sono riportati nelle tabelle seguenti.

In tabella 3 si nota un certo scostamento sistematico delle rilevazioni effettuate con il sistema a scintillazione da quelle effettuate con gli altri due metodi. In seguito a tale risultato i sistemi sono stati ricalibrati indipendentemente e si è così ottenuto il risultato della tabella 4 che evidenzia un ottimo accordo tra le diverse metodiche.

Prelievo Id.	Ora prelievo	C <sub>Rn</sub> (Bq/l)		
		Collettore	Beaker Marinelli	Scintillazione liquida
1	11.12	230 ± 6	228 ± 8	206 ± 12
2	11.15	229 ± 6	225 ± 8	202 ± 12
3	11.17	230 ± 6	228 ± 8	213 ± 12
4	11.22	226 ± 6	230 ± 8	208 ± 12
5	11.24	225 ± 5	230 ± 8	205 ± 12
6	11.26	225 ± 5	228 ± 8	201 ± 12
7	11.29	232 ± 6	235 ± 8	211 ± 12
8	11.33	235 ± 6	231 ± 8	200 ± 12

**Tabella 3** - Prelievi effettuati presso i LNF (Frascati) il 10/3/98. Concentrazioni di radon (C<sub>Rn</sub>) riscontrate con Beaker Marinelli da 0.95 l, con collettori a carboni attivi da ø6 cm e con la scintillazione liquida

Prelievo Id.	Ora prelievo	C <sub>Rn</sub> (Bq/l)		
		Collettore	Beaker Marinelli	Scintillazione liquida
1	11.35	211 ± 5	222 ± 8	208 ± 13
2	11.38	226 ± 5	218 ± 8	221 ± 14
3	11.41	228 ± 6	222 ± 8	226 ± 14
4	11.45	232 ± 6	226 ± 8	226 ± 14
5	11.47	221 ± 5	225 ± 8	223 ± 14
6	11.50	230 ± 6	222 ± 8	231 ± 15
7	11.53	227 ± 5	230 ± 8	227 ± 14
8	11.56	230 ± 6	224 ± 8	244 ± 15

**Tabella 4** - Prelievi effettuati presso i LNF (Frascati) il 28/4/98. Concentrazioni di radon (C<sub>Rn</sub>) riscontrate con Beaker Marinelli da 0.95 l, con collettori a carboni attivi da ø6 cm e con la scintillazione liquida

## Bibliografia

1. EPA. *"Radon in water sampling program"*. EPA/EERF-MANUAL-78-1, USA, 1978.
2. P. Belloni, G. Ingraio, G. P. Santaroni, G. Torri, R. Vasselli. *"Misure di  $^{222}\text{Rn}$  in alcune acque potabili mediante scintillazione liquida quale contributo al calcolo della dose"* In Atti del 5° Convegno su Metodologie Radiochimiche e Radiometriche in Radioprotezione, pp. 181-186, Urbino, Giugno 1995

**Temporized measurement of groundwater radon concentration by  
alpha-scintillation counting, for continuous monitoring addressed  
to natural hazards surveillance**

*Galli G (\*), Mancini C. (\*), Quattrocchi F. (\*\*)*

(\*) DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA NUCLEARE E CONVERSIONI DI ENERGIA (DINCE)

UNIVERSITA' LA SAPIENZA DI ROMA

Piazza S. Pietro in Vincoli, 10, 00185, Roma

(\*\*) ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA (ING)

Via di Vigna Murata 605, 00143, Roma

**Keywords:** continuous radon monitor prototype, review of methods, seismic, volcanic and environmental surveillance.

**Abstract:** A “quasi continuous mode” monitoring system to measure the radon concentration within a natural environment (mainly groundwater), was designed, assembled and tested, under collaboration between DINCE and ING, partly within the framework of two EC funded programs.

The radon monitor consists of a customised discrete automatic sampler which produces a gas flux circuit, and an economical  $\alpha$ -scintillation cell, coupled with a reliable electronic-photo-multiplier. A convenient calibration system together with a temporised control system have been set up. The overall “mean efficiency” of the system was calculated to be  $7.79 \pm 0.13$  counts per minute (cpm) for each Bq/L.

Taking into consideration the present and future requirements of a geochemical surveillance network to assess natural hazards, the prototype design evolved from the study of existing systems devoted to monitor radon concentration levels, which are critically reviewed within this paper.

In response to the main pre-requisite of a remote station: maximum remote sensor versatility preserving shared software and hardware for the network as a whole, this radon monitoring system was conceived as part of a multi-parametric *Geochemical Monitoring System* (GMS II) prototype, designed and realised as a *test-stand* for sensors (chemical, hydrological, geophysical, organic chemistry devoted, etc.) in continuous evolution throughout the international market.

## **Introduction**

Scientific research into the development of radon continuous monitoring instrumentation began in 1960 following the discovery of the possible use of radon for earthquake prediction (Okabe, 1956; Ulomov & Mavashev, 1967; Sadovsky et al., 1972; Scholz et al., 1973; Myachkin et al., 1975; Hauksson, 1981; Thomas et al., 1988).

The development of enhanced “radon sensors” (Quattrocchi et al., 1997a; Mancini et al., 1998), was conceived as part of the GMS II prototype (*Geochemical Monitoring System*,



prototype II) a fully versatile multi-parametric geochemical continuous monitoring system (Fig. 1), designed for natural hazards surveillance (Quattrocchi et al., 1996; Lombardi et al., 1998; Sciacca & Quattrocchi, 1997; Quattrocchi et al. 1999) in the frame of two ECE funded programs: *Geochemical Seismic Zonation* and *Automatic Geochemical Monitoring of Volcanoes* (EC Program 1996-98 a, b).



**Figure 1:** The *Geochemical Monitoring System II* prototype (GMS II) designed and assembled by ING. Consisting of a PC-IBM compatible computer (2 serial port equipped, Window95 available), an ING-designed *serial collector-multiplexer*. (black box, in front of computer) serial port collector, A/D *signal conditioning systems* (eight up to date) for the available sensors. The sensors shown are from left: He-mass spectrometer (*Alcatel™ ASM 100 HDS* continuous He flux detector), atmospheric pressure, air temperature, electrical conductivity in groundwater (*B&C Electronics™*), CO<sub>2</sub> partial pressure in groundwater (*Idronaut™*), pH, Eh and temperature (*Endress & Hauser™*). The Radon in groundwater signal has a serial port available, within the *serial collector-multiplexer*.

Previously, the discrete radon measurement had often been coupled with other geochemical parameters, chiefly gaseous (such as He, CH<sub>4</sub>, Ne, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, etc.), but a full multi-parametric approach was found to be lacking, most of all during continuous monitoring. Consequently, The GMS II remote station was conceived as a test-stand for upgraded geochemical, hydrological, environmental and geophysical sensors in continual evolution

(the only prerequisite being a known analogic output), linked to environmental quality control and applied geophysics.

The *Department of Nuclear Engineering of “La Sapienza” University of Rome (DINCE)* has devoted many years to the designing, assembling, testing and certification of different discrete and continuous radio-nuclide monitoring systems, with radon and its daughters meriting special attention (Mancini & Giannelli, 1995; Belloni et al., 1995, Mancini et al., 1998).

Therefore, the scientific requirements and the experience of ING and DINCE respectively, permit the conception of radon monitor prototypes as part of the GMS II remote station design, taking into consideration the different pre-requisites of remote radon monitoring.

In this paper, following a critical overview of the evolution of radon monitors developed by research institutes devoted to earthquake surveillance (primarily adopting the  $\alpha$ -scintillation methods), we will design and realise a radon monitor, with emphasis on the most important aspects and taking into consideration all the prototypes reviewed. Finally, we will present our  $\alpha$ -scintillation method prototype, developed entirely under collaboration between DINCE and ING.

### **Overview of the evolution of radon continuous monitoring devices, focusing on $\alpha$ -counting methods.**

In recent decades both earthquake and volcanic eruption forecasting research and radon indoor hazard assessment have stimulated the enhancement, design and assembling of radon monitors, properly conceived for seismo-tectonical surveillance studies. In particular,  $\alpha$ -counting detectors have been developed since the sixties.

Many countries have gathered experience in the discrete and continuous monitoring of radon gas, either in groundwater, or in soil gases. In particular, scientists in Japan, China, Taiwan, U.S.A., ex USSR, Italy, France, Germany, Austria, Greece and India, have addressed this matter in relation to seismo-tectonic problems (Shapiro et al., 1980; Hauksson, 1981; Mendenhall et al., 1981; King, 1986; Wakita et al., 1989 a,b; Igarashi et al., 1993; King, 1993; Igarashi & Wakita, 1995).

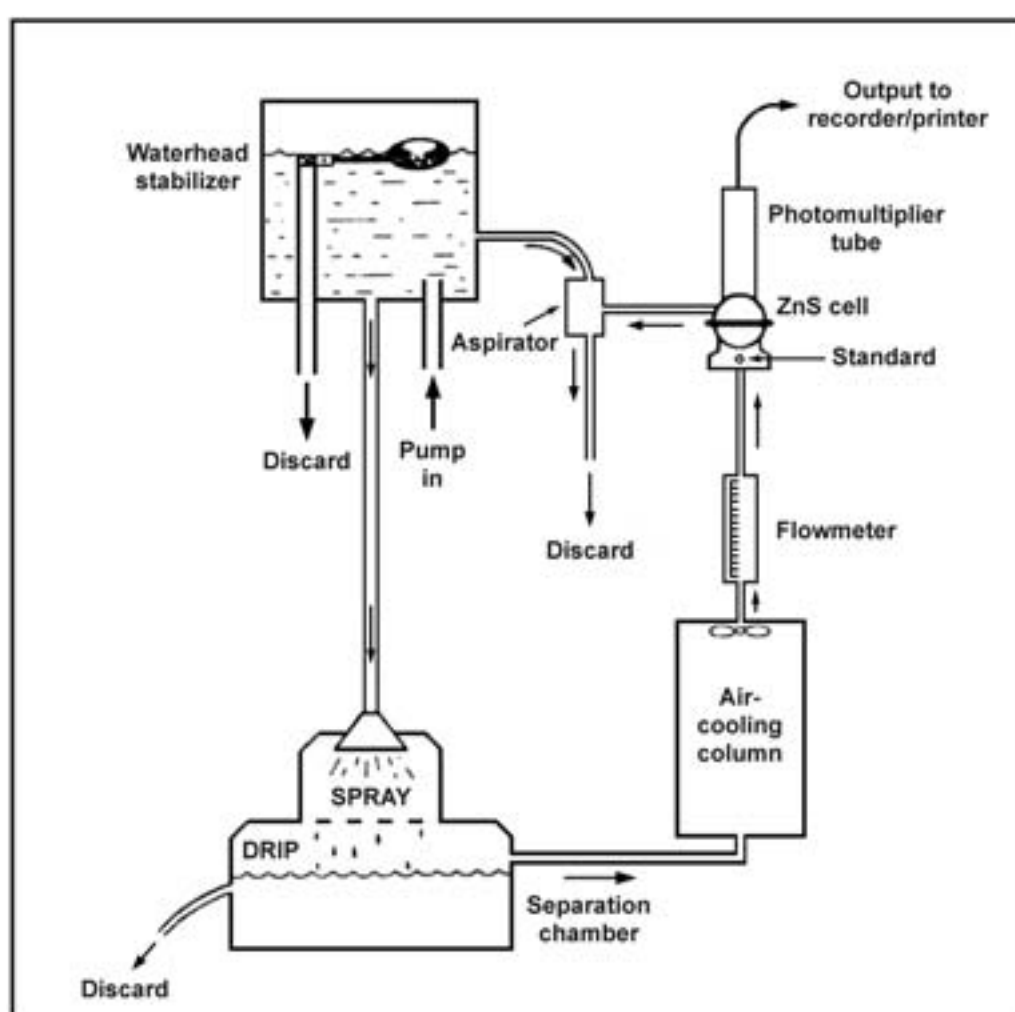
At the same time, extensive knowledge that could be applied to earthquake prediction research was accumulated regarding the basic behaviour of radon gas in natural environments, (Schroeder et al., 1965; Soonawala & Telford, 1980; Holub & Brady, 1981; Kristiansson & Malmquis, 1982; Megumi & Mamuro, 1987; Torgersen et al., 1990; Varhegyi et al., 1992; Zhang et al., 1994).

China has suffered many disastrous earthquakes in its long history. During the decade 1966-76 alone, 14 large earthquakes of magnitude 7.0 to 7.9 occurred on the Chinese mainland, and 4 others near the island of Taiwan. During the sixties, the Government of the People's Republic of China promoted an intensive 'earthquake prediction/hazard reduction' program. As a result of this large scale effort of both scientific and financial resources, several earthquakes were reported successfully predicted (Haikeng, 04/02/1975; Longling, 29/05/1975; Songpan-Pingwu, 16-23/09/1976), and thousands lives were saved (Wakita, 1978; King, 1985).

In this framework, coupled with the widespread use of radon discrete monitoring (around 1000 observation sites, see Tang, 1978, Shi & Cai, 1986) by adopting a standardised device (pre-evacuated 150-ml glass bottles connected to a drier column and to a pre-evacuated detection chamber, with final Rn measures either by ionisation or ZnS(Ag)

scintillation chamber), the Chinese earthquake prediction program was the first to enhance the use of continuous radon monitoring.

Several types of continuous radon monitors have been designed and developed in China. The first model, adopting the ZnS(Ag) cells (FD118, *Habei Seismological Bureau*, 1973, see details in Zhu and Wang, 1978), was a portable instrument with a *continuous flushing device* and a 7V battery (detection limit: 18.5 Bq/L), operating either in a continuous or in an intermittent mode. Among the problems observed when operating with this device, was a slow build-up of  $\alpha$ -background counting due to the accumulation of alpha-emitting radon daughters within the scintillation chamber. Of the several *continuous flushing devices* (systems designed to extract the Rn-gas from groundwater in a continuous mode) developed in China, the most commonly used was that designed by Teng (1980), as shown in Fig. 2.



**Figure 2:** Scheme diagram of the Chinese continuous radon monitor, by Teng, 1980 (modified after King, 1985).

Two other types of automatic radon monitors developed by the Chinese were the FD128 (*Tianjin Seismological Bureau*, 1978 a) and the JSZ1; the second developed in 1974 (Li et

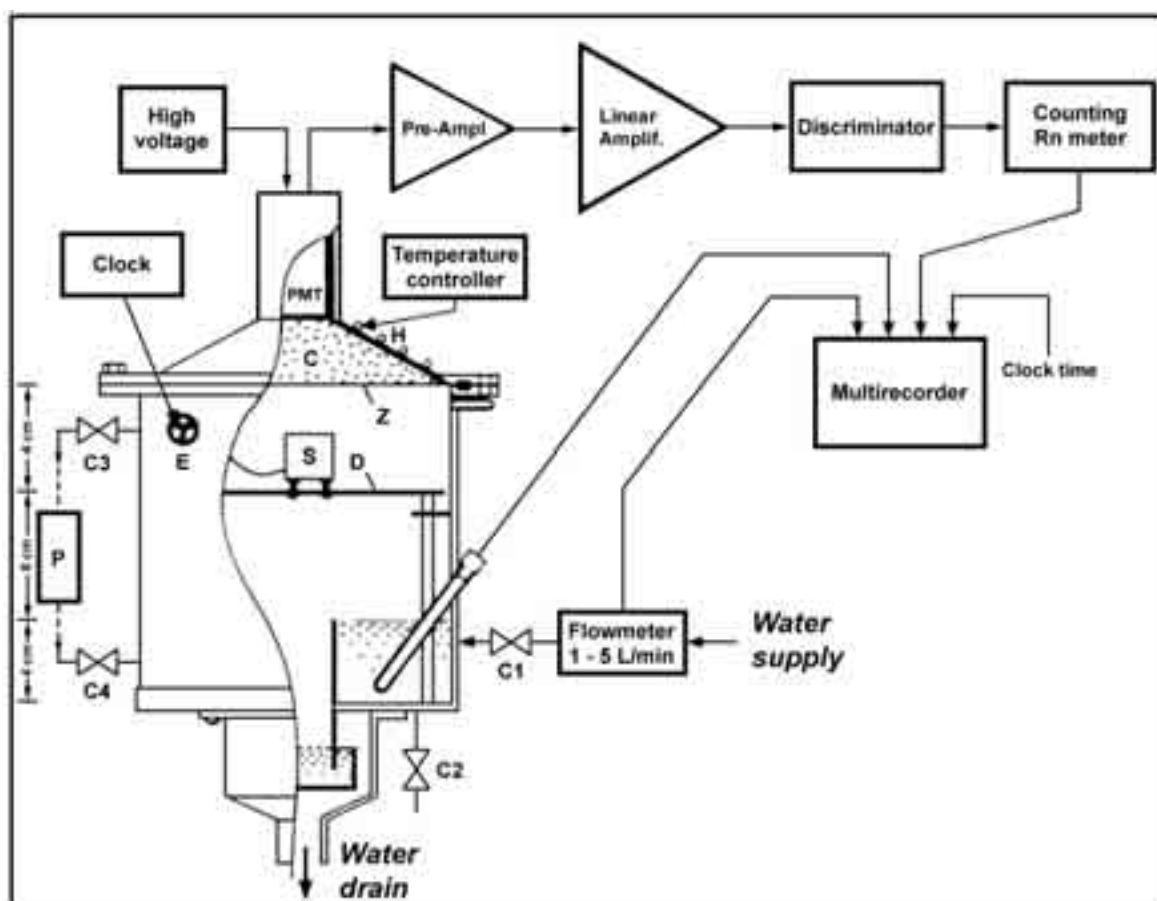
al., 1978), has since been modified many times (sensitivity of 200 cpm for each Bq/L). Both instruments adopt an  $\alpha$ -scintillation cell and a digital recorder using 220V AC power and, as a *continuous flushing device*, require a water-head of around 2 meters, which severely limits the usefulness of these prototypes in remote areas where only low pressure water sources are available.

The FD128 monitor, developed in 1975 by the *Instrument Factory 261 - Tianjin Seismological Bureau* had a sensitivity of 100 cpm for each Bq/L. Successively the *Tianjin Seismological Bureau* (1978 b), in collaboration with the *Institute of Nuclear Physics of Shanghai* assembled another type of automatic radon monitor, adopting a NaI(Tl) crystal, to detect gamma rays generated by the radon daughters,  $^{214}\text{Pb}$  and  $^{214}\text{Bi}$ . Similar to that, a prototype was developed in U.S.A. by Smith et al. (1976), with a sensitivity around 160 cpm for each Bq/L.

Another NaI(Tl) gamma detector, also similar to that of Smith (1976), was used submerged in a spring pool (Wollemberg et al., 1985). In this manner the sensor was shielded by 1 meter of water (cutting the  $^{40}\text{K}$  and  $^{208}\text{Tl}$  appreciable peaks). The data were recorded hourly by a gain-stabilised gamma spectrometer, whose output was chosen in a gamma-energy window by selecting the integration time of one hour in relation to the residence time of water within the pool. This interval in the gamma-ray spectrum recorded a contribution predominantly from  $^{214}\text{Bi}$ , a daughter of  $^{222}\text{Rn}$ .

In Japan, one of the most reliable radon monitors designed for earthquake prediction, was assembled and tested by a collaboration between the *Earthquake Chemistry Laboratory - University of Tokyo* and the *Radioisotope School of the Japan Atomic Energy Research Institute of Tokyo* (Noguchi & Wakita, 1977). Also adopting the  $\alpha$ -scintillation method (taking up an enhanced photo-multiplier and high-reliability electronic accessories), this equipment gathered important scientific results when used to improve a radon monitoring network throughout seismically active areas in Japan (Wakita et al., 1985; Wakita et al., 1989 a,b; Wyss, 1991).

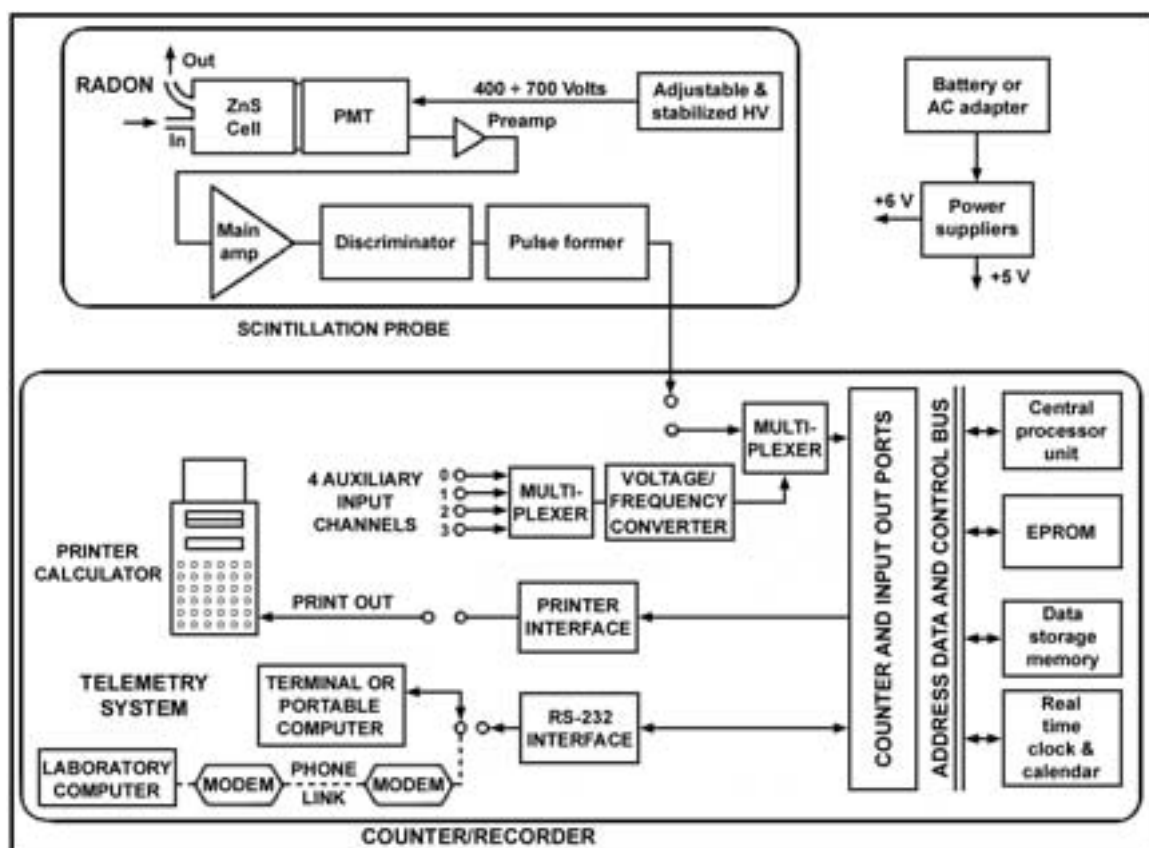
The development of this Japanese prototype (Fig. 3) included a customised *scintillation chamber*, coupled with a *radon separation chamber* (stainless steel, 20 x 18 cm). The scintillation chamber was modified in respect to previous prototypes, by either choosing the best scintillation powder thickness ( $5 \text{ mg/cm}^2$ ) with a best-fit of the counting efficiency, or, by adding a thin layer of plastic film ( $0.5 \text{ mg/cm}^2$ ), to grant better moisture protection to the scintillation surface. Another finding was the introduction of a permanent  $\alpha$ -source ( $^{210}\text{Po}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ), daily checking the instrumentation response and drift. By varying the geometry of the volumetric ratio between separation and scintillation chambers, it was possible to obtain different plateau responses of the detector, as a function of the remote site radon concentration. Also, by varying the high voltage and amplifier gain of the photo-multiplier linked to the scintillation chamber, it was possible to alter the sensitivity (stability/efficiency) of the system as a whole. There are no on-line pumps to create a vacuum within the separation or scintillation chambers, making the *continuous flushing device* of this prototype more simple: only the coefficient distribution laws between air and water drive the separation between the two phases. For this reason, attention is made to ensure that the temperature of the scintillation chamber is higher than that of groundwater (around  $10^\circ\text{C}$ ). This equipment in standard use provides: *background* as 2 cpm corresponding to 0.07 Bq/L (calibration factor = 28 cpm for each Bq/L, obtained by the parallel discrete measurement using toluene extraction-liquid scintillation counting), background drift of 1.6 % per year, limit of detection as 0.22 Bq/L, linearity up to 370 Bq/L, and counting efficiency as 30 %).



**Figure 3:** Configuration of the Japanese network radon continuous monitor, managed by the *Earthquake Chemistry Laboratory of the University of Tokyo*. C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> are stop cocks; D = spacer (20 cm diameter); I = terminals; H = heater; E = light guide; P = air pump; PMT = photo-multiplier tube; S = alpha-ray source, collimator and shutter; T = thermometer; Z = ZnS(Ag) scintillation surface (modified after Noguchi & Wakita, 1977).

Since 1978 in the U.S.A., the *Department of Geological Sciences, University of Southern California* in Los Angeles has developed the CRM as a prototype for continuous radon monitoring (Sun & Teng, 1983; Teng & Sun, 1986; Chung, 1985). The system (Fig. 4) uses a customised  $\alpha$ -scintillation cell (6 x 8 cm, coated with a thin film to prevent moisture from wetting the ZnS(Ag) powder), coupled with a photo-multiplier, together with a good quality preamplifier, stabilised high voltage device, amplifier, discriminator and pulse counter. The noteworthy performance of this system is due to the high resolution  $\alpha$ -scintillation counting, the adoption of a CMOS microprocessor to lower consumption, the presence of four free channels to add further physic-chemical and environmental parameters, and to the presence of a RS232 output port for data tele-metering. The CRM's most notable feature resides in the special flushing probe (100 x 10 cm, PVC, with efficiency relying on air flow-rate), adopted as the *continuous flushing device* in this prototype. It is mounted within the well and designed for stripping gas from groundwater. Despite the good design, this kind of flushing probe is not useful for any remote site condition as generally found during seismic-volcanic hazard surveillance. From the flushing probe to the  $\alpha$ -scintillation cell, the humidity in the circuit is cut by copper tubing that improves the cooling effects. As the presence of H<sub>2</sub>S was seen to shorten the

scintillation cell life, the problem was partially overcome in the CRM with the addition of *copper wool* before the cell port. The overall counting efficiency was calculated to be 75% and the calibration was performed by a  $^{226}\text{Ra}$  standard solution, but the final conversion between cpm and Bq/L is not specified by the Authors (only 30 counts for each 0.016 Bq/Kg is mentioned). Also for this system, as for that of Noguchi & Wakita (1977), since the long-lived  $^{210}\text{Pb}$  (half-life 22.2 years) in the radon decay chain may accumulate in the detector cell, its  $\alpha$ -decaying daughter  $^{210}\text{Po}$  (half-life 138 days) may increase the detector cell background. The CRM background build-up rate was inferred to be only 1.5% annually during the first few years of constant cell activity.



**Figure 4:** Block diagram of the Continuous Radon Monitor (CRM), designed and developed by the *Department of Geological Science, University of Southern California, U.S.A.* (modified after Teng & Sun, 1986).

During the in-situ test performance, the CRM monitor has shown a noteworthy signal reduction during groundwater pumping variations, involving water flow-rate changes.

At the end of the seventies, a few alternative procedures (to the  $\alpha$ -scintillation cell method) were developed to monitor radon concentration levels.

In the U.S.A., Chatley (1977) developed a continuous radon monitor in which the radon gas is stripped from the water by nitrogen bubbles; the flow is driven within a ionisation chamber, where the induced ionisation is recorded as a current proportional to the  $\alpha$ -decay event per unit time. The authors that used this device found that constancy of the *continuous flushing device* (flow-rates of spring-water through the bubble maker, and of

gas bubbles into the ionisation chamber), was essential to allow reproducible results (Talwani et al., 1980).

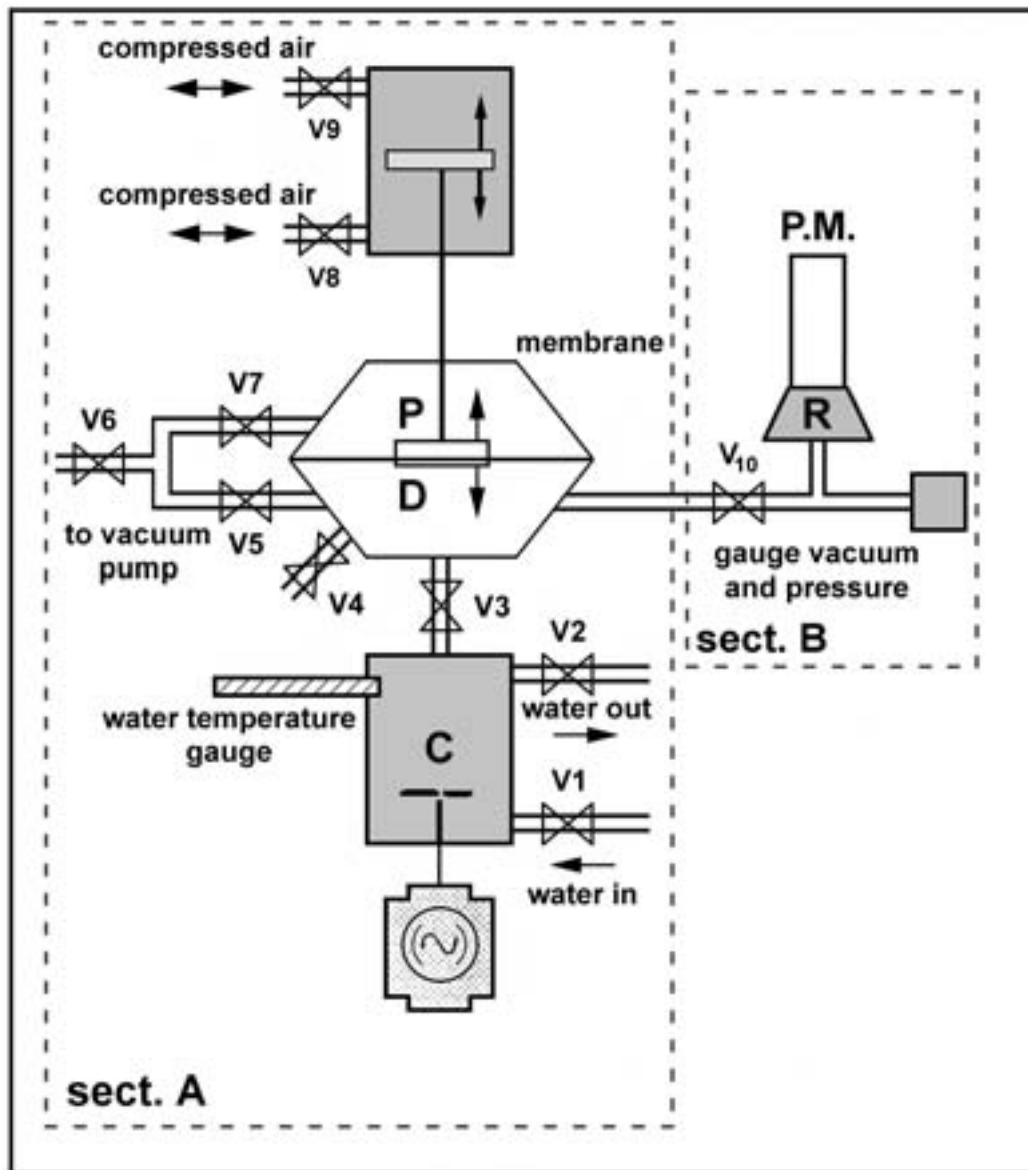
Friedmann & Hernegger (1978) developed a method for continuous radon measurement, either from liquid or gaseous phase, by using an ionisation chamber and the basic physical principle that the produced ionisation current is proportional to the radon content in water. This system was more recently used to monitor radon concentration in a few sensitive sites located in Austria (Friedmann, 1985; Friedmann, 1991). A description of an improvement to this system is described in Friedmann (1983): the *continuous flushing device* was made up by a gas extraction system, similar to those used in other described prototypes, but in this case a certain kind of water-jet vacuum pump, followed by a gas separator has been preferred. The author, in an attempt to select the proper air/water ratio during the continuous flow monitoring, inferred the best situation using 1 litre of air per 3 litres of water, in this way increasing the extraction rate by a double factor with respect to an equal air/water ratio. With these calculations it is important to take in consideration that if it is true that more radon, relative to more water volume could be extracted with the same gas volume (1 litre), vice-versa the total extraction efficiency as a whole decreases. In this system, the radon concentration limit of detection (MDL) spans from 0.4 to 4 Bq/L. With the activities to be measured being around 4 to 40 Bq/L, this method could therefore be useful with a background/signal ratio of around 10-100. More than an absolute calibration, the authors preferred a calibration with a standard, but no final values have been reported. The low level concentration, typical of the natural fluids to be monitored in sensitive sites throughout seismically active areas, requires a very sensitive method. For all these above authors, the determination of  $\alpha$ -particles prevails as the most sensitive method that could be accomplished, either by the measurement of the counting rate or by the measurement of ionisation current. Motives for these last two Authors to indicate a preference for the ionisation chamber in place of the scintillation cell, are to be found in the following factors: with the scintillation cell comes the use of more complicated electronic equipment; the scintillation surface is more subject to damage, or to generate drifts (by condensation, daughter accumulation, drop of efficiency, etc...), and the sensitivity is limited by the impossibility to have a 1/1 ratio between the  $\alpha$ -particles generation and the  $\alpha$ -particles scintillation (due to distance from the scintillator and other factors), as a function of the cell geometry.

On the other hand, among disadvantages to characterise the ionisation chamber with respect the  $\alpha$ -scintillation cell is that the humidity of the extracted gases could notably affect the radon concentration measure accuracy and precision. Despite this possibility, the above mentioned authors did not advise the need to dry the inlet gas under monitoring.

Another aspect to be taken in consideration for future ING requisites at likely selected sites, is the presence of other gases accompanying the radon, such as CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S. With the ionisation chamber prototype assembled by Friedmann and Hernegger (1978), the influence of a small quantity of other acidic and reducing gases extracted from water was inferred to be negligible. With having H<sub>2</sub>S rich springs to monitor, this fact could balance the benefits/costs ratio in favour of the adoption of the ionisation chamber method, in place of the  $\alpha$ -scintillation cell system. Nevertheless, the frequent (i.e., monthly) renewing of ZnS(Ag) walls or the cell as a whole (revitalisation step) could overcome this problem with the  $\alpha$ -scintillation cell method.

Another prototype developed at the end of the seventies for earthquake prediction research, which preferred a method other than that of the  $\alpha$ -scintillation cell, was that of Melvin et al., (1978). Consisting of a  $\beta$ -counting device using a pancake-type Geiger tube and aerosol filtration technique, this was the first sensor to detect combined radon and thoron activities.

It was during the eighties that scientists in Italy began serious development of continuous radon monitors, as applied to seismic and volcanic surveillance.



**Figure 5:** The radon continuous monitor developed by the *Dipartimento di Fisica Università “La Sapienza” di Roma e III Università di Roma* (modified after Bella et al., 1993). P = piston; D = expansion chamber, C = water container; V<sub>1</sub> - V<sub>10</sub> = Electro-valves; R = scintillation cell; P.M. = photo-multiplier. Section A = radon extraction system; Section B = detecting system.

An automatic system to monitor groundwater radon was developed (Fig. 5) by the *Department of Physics, University “La Sapienza” of Rome*, by Bella et al., (1993) adopting a semi-continuous (discrete temporised sampling) monitoring method, in this way avoiding the use of a *continuous flushing device* (albeit that this semi-continuous system is not simplified in the scheduled temporisation and servo-mechanisms, with respect to our prototype too). The de-emanation of the gases from discrete aliquot of water (1 litre) is



assured by evacuating an expansion chamber, after stirring and heating steps, while vacuum and pressure levels are measured and recorded (*extraction system*). The *detecting system* is made up by way of a traditional silver activated zinc sulphide cell, coupled with a high-voltage provided photo-multiplier. The efficiency of the system was found to be around 40 cpm for each Bq/L (the final concentration depends on the water volume stored, usually 1 litre). The sampling frequency flexibility (1 datum/hour - 1 datum/99hours) is coupled with the flexibility of the scheduled phases of re-filling, pauses, counting, etc.,. However, the system was ultimately tested only with a sampling frequency of two measurement per day. Complex steps are assured by a sequence-driver to obtain temporised calibrations ( $^{241}\text{Am}$  tablet source) of background dropping within the cell (up to 1-2 cpm), full evacuation of the chambers, emptying of the equipment, working pauses, etc.,.

This system could be considered one of the most complex radon monitor prototypes developed to date, mostly as a consequence of the importance given by the Authors (Biagi, personnel communication, 1998) for the need to cut, as much as possible, the very high  $\alpha$ -counting background drifting. With all probability, this high drift (1.5 % / week) was indicated when using groundwater with a very high radon concentration. The experience gathered during the monitoring period with this equipment at the Capore site (Mt. Sabini, Latium, Italy), deserves special interest with respect to the proper choice of artesian wells for radon monitoring.

Despite the noteworthy potential performance of the described prototype, it could be considered not strictly necessary, both to have a calibration tablet inside the scintillation chamber (by performing periodical cross-comparisons with other methods and standard sources) and to reach a perfectly clean scintillation cell (background dropping) during the pause step (considering the mean signal drift within the ZnS(Ag) cell of around 1.5%/year, as inferred by various authors). Moreover, the recording of the measures of i.e., “internal vacuum” and “extracted gases pressures” could become redundant and the complexity of the multiple scheduled steps could be partially removed, simplifying the temporisation and the assemblage of the entire system. We should consider the final purpose of these prototypes: detection of anomalies i.e.,  $3\sigma$ , within a sufficiently reliable *background* signal. The possibly busy and difficult final data management to correct the radon concentration readings with the other values available (vacuum, pressures, calibration signal, etc...) suggest us to prefer a more simplified system that will still fulfil the research mandatory goals.

In line with this thinking, and considering the low cost/benefits of the improved software/hardware systems available, the ING started to develop radon monitor prototypes in 1993, adopting up to date  $\alpha$ -scintillation methods (Calcara & Quattrocchi, 1993; Quattrocchi et al., 1997) as time progressed. A final version of the first reliable  $^{222}\text{Rn}$  low cost monitoring prototype (Fig. 6), was assembled and tested (Quattrocchi et al., 1997), remaining actually on line (at the time of writing ) at the *Arta Terme - Friuli* site (Garavaglia et al., 1997 a). It operates with an  $\alpha$ -scintillation technique (EDA Instrument cell, Canada), coupled with a customised *continuous flushing device* that lets continuous dehumidified gas flow, stripped from a groundwater flux under monitoring, by using a double-head peristaltic pump (air and water simultaneously). This flow system was developed to minimise external noise, to improve the *stripping efficiency* (final gas/water ratio chosen equal to 0.5) and most of all, to obtain the greatest possible level of stability in the gas flow under monitoring. The following conditions had driven the first ING prototype design: serviceable in sites with low-level radiation ( $< 5\text{ Bq/L}$ ), the most simple configuration possible due to the requirements of low maintenance and high stability for long periods. For the above-described system, a proper calibration factor calculation is

lacking as a consequence of their principle requirement being to check the temporal trend variations (cpm unit) and not the absolute concentration values. A  $^{241}\text{Am}$  radioactive standard source was used to test the stability of the photo-multiplier-cell assemblage. We reasoned that to improve the *stripping efficiency* was a decisive factor in refining the sensitivity and precision of the system as a whole, and we concluded that there was a strong need for more improved and reliable radon monitor prototypes.



**Figure 6:** Photo of the radon continuous monitor designed and developed by Istituto Nazionale di Geofisica (Quattrocchi et al., 1997).

The radon concentration anomaly discovered before the 17/1/1995 Kobe earthquake in Japan (spanning a few months with a ten-fold peak 9 days before the event, 30 Km distant), was measured by an improved radon monitor assembly device (Igarashi et al., 1995), following the developments in low level  $\alpha$ -particle detection since 1989, at the *Kamiokande - Underground Cosmic Ray Observatory*. As the system is assisted by a

semiconductor  $\alpha$ -particle detector (PIN photo-diode) with high energy resolution, it can discriminate  $\alpha$ -particles emitted by daughter nuclei of radon from other  $\alpha$ -particles and  $\gamma$  rays with higher and lower energies, which enables noise-free radon monitoring.

This radon monitor system consists of a detection chamber, coincident with the *continuous flushing device*, that is continuously refilled by groundwater (1 litre / minute); at the same time the dissolved gases are degassed within the detection chamber itself. The top of the chamber is equipped with a electrostatic collector container, mounted just above the interface between the gaseous and liquid phases within the chamber. The container is equipped with the above mentioned  $\alpha$ -particle detector ( $1\text{ cm}^2$ ) with a high voltage powered PIN-photo-diode (*Hamamatsu Photonics, K.K.*), versus a low voltage ( $-120\text{ V}$ ) at the bottom of the container, to allow migration of the gas ion particles to the top ( $^{214}\text{Po}$  -  $^{218}\text{Po}$ ); proportionally amplified electric currents are then managed by an AD converter (256 channel high-speed), coupled with a PC.

From the studies performed by Thomas et al. (1989, 1992) a new radon monitor was developed to possibly expand a radon monitoring network. It consists of a portable battery powered, *passive*  $\alpha$ -particle detector (*Alpha-logger*, manufactured by *Alpha Nuclear Corporation, Canada*) with a stainless steel housing, containing (from the sensor to the signal output): a polyethylene diffusion barrier, a detection volume, a  $400\text{ mm}^2$  silicon diffused junction detector protected behind an aluminised *Mylar* window, pulse conditioning and counting circuitry, a microprocessor, a non volatile data-buffer and finally, a four-conductor power and data-cable. It has the capacity to record  $\alpha$ -counting in 15 minutes increments over a period of 40 days, without maintenance of the batteries. Data down-loading is performed by a LAPTOP- PC.

The above-mentioned radon monitor was adopted under the “*Himalayan Seismicity Program*” of the *Department of Science and Technology, Government of India*, in 1993 (Virk et al., 1995), enhancing a small radon monitoring network in India. The detector unit can be located at a depth of 60-150 cm, (Thomas et al., 1992; Virk & Singh, 1995; Virk & Baljinder, 1993) and is normally used to monitor soil-gas radon concentration, rather than groundwater (probably due to low sensibility problems).

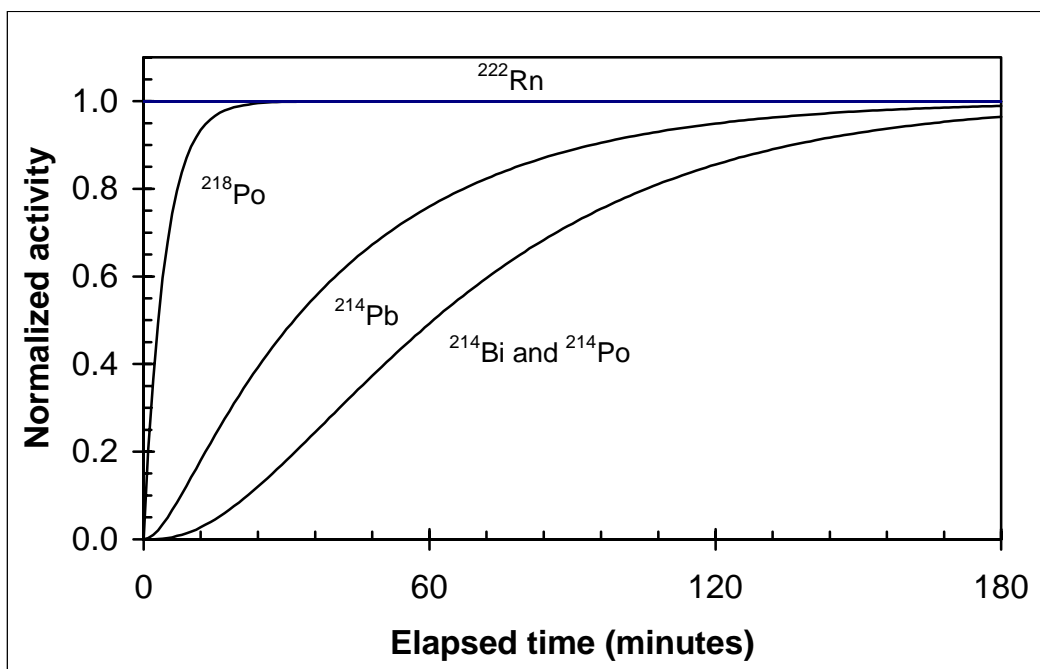
This type of scintillation counter is often used throughout the international panorama of environmental - seismic hazard monitoring. Woith et al., (1991), in the frame of the *Turkish-German Project* along the very active *North Anatolian Fault Zone* (NAFZ) (Honkura & Isikara, 1991), has preferred the use of a scintillation counter since 1989. In this case however, groundwater rising bubbles are simply captured with a funnel, without the use of a *continuous flushing device*. Information is accumulated hourly in a local data logger and downloaded every six months.

An improved measuring system EPOS1 (EPOS: Earthquake Precursor Observation System) was developed recently (Streil et al., 1997) following field experience gained with the continuous measuring of  $\text{CO}_2$  and Radon together (Koch & Heinicke, 1996; Heinicke et al., 1995). The EPOS1 is a multi-parametric station with up to 17 free channels available. The radon measurement is accomplished by a SARAD instrument: a microcomputer system for handling data exchange, data management and control is provided. It is connected to a modular sensor system, in accordance with the peculiar needs of the sites to be monitored. Fast radon gas transfer membrane, consisting of a special plastic material, guarantees diffusion times of lower than 3 minutes. Using this method for measuring the radon concentration in water, a time resolution of 10 minutes is possible. The radon is measured by a humidity corrected, alpha - spectrometric monitor system, using charge collection for higher efficiency.

## Method and materials

The measure of radon concentration, by detection of radiation emitted by the decay of the short-lived ( $T_{1/2}$ ) daughters, is always correlated to the radon dissolved in groundwater in a time preceding that of actual measurement by at least three hours. Indeed, more than three hours are necessary to carry the decay chain through, from  $^{222}\text{Rn}$  to  $^{214}\text{Po}$ . This isotope is the last of the chain of the short lived daughters, as a consequence of its  $T_{1/2}$  equal to 164  $\mu\text{s}$ , decaying with an  $\alpha$ -particle emission to  $^{210}\text{Pb}$ , which has a half life of  $T_{1/2}$  equal to 22.3 years.

The accumulation curve of the short-lived daughters of radon is shown in fig.7. For an initial unitary activity, three hours are considered necessary for these daughters to almost reach equilibrium with radon.



**Figure 7:** Accumulation curve of the short-lived radon daughters

The  $\alpha$  particles emitted by  $^{222}\text{Rn}$ , by  $^{218}\text{Po}$  and by  $^{214}\text{Po}$  are revealed in the radon concentration measure made by a scintillation cell.

A continuous measurement of the groundwater radon concentration, can be performed by firstly degassing in a continuous mode, a water flux from a spring/well (i.e., Quattrocchi et al., 1997 a) and then successively detecting continuously, the scintillation produced by the  $\alpha$  particles emitted by radon and its daughters, within the scintillation cell and/or deposited on the walls.

This method requires a procedure for drawing water from the spring/well without interruption; a condition that is not always obtainable. Therefore, in consideration of the above-mentioned fact that the response of the detector doesn't quickly follow the possible radon concentration variations, we elected to design and realise a system operating in a "quasi continuous mode", by means of the discrete sampling of few litres every three hours (1 datum every three hours at least).

From here, our choice of rendering *discrete* the sampling was decided: we emphasise that after monitoring is started afresh, it takes about three hours for the daughters of  $^{222}\text{Rn}$  to reach transient equilibrium with the parent. In this way, any rapid increase in radon will be observed as a slower and smaller increase in the recorded alpha activity, because the daughters need time to “catch up” with the radon increase. If radon variation continues, then the daughters activity will be essentially tracing the radon activity with a time lag. The time lag, however, is too short to affect the relatively long anomalous changes (days, or even months). When groundwater with a different amount of radon concentration is introduced, the response time of the counting rate is rather slow, taking about 2 hours to reach the  $1/e$  of the equilibrium value because of the greater time required by the radon daughters to reach radioactive equilibrium and concentration equilibrium in the chamber.

The groundwater radon concentration measuring system consists of a customised scintillation cell, coupled with a photo-multiplier, seated within a 2.9 L volume cylinder. It was designed to contain the sample of degassing air, initially dissolved in the discrete aliquot of groundwater (0.5 litres), as shown in Fig. 8.

A measuring cycle is performed by the following successive phases: the water flows into the beaker, ascending from the vicinity of the bottom and overflowing to the top, within the time interval necessary to a complete displacement of the initial water volume contained within the beaker in relation to the previous cycle; a few litres of water are sufficient for this procedure. At the same time, a membrane pump effects firstly, renewal of the air contained in the cylinder by drawing from the external environment and secondly, a partial evacuation.

At the end of these phases, the opening of a needle valve allows the bubbling of the external environment air within the water filled beaker, until pressure equilibrium is reached.

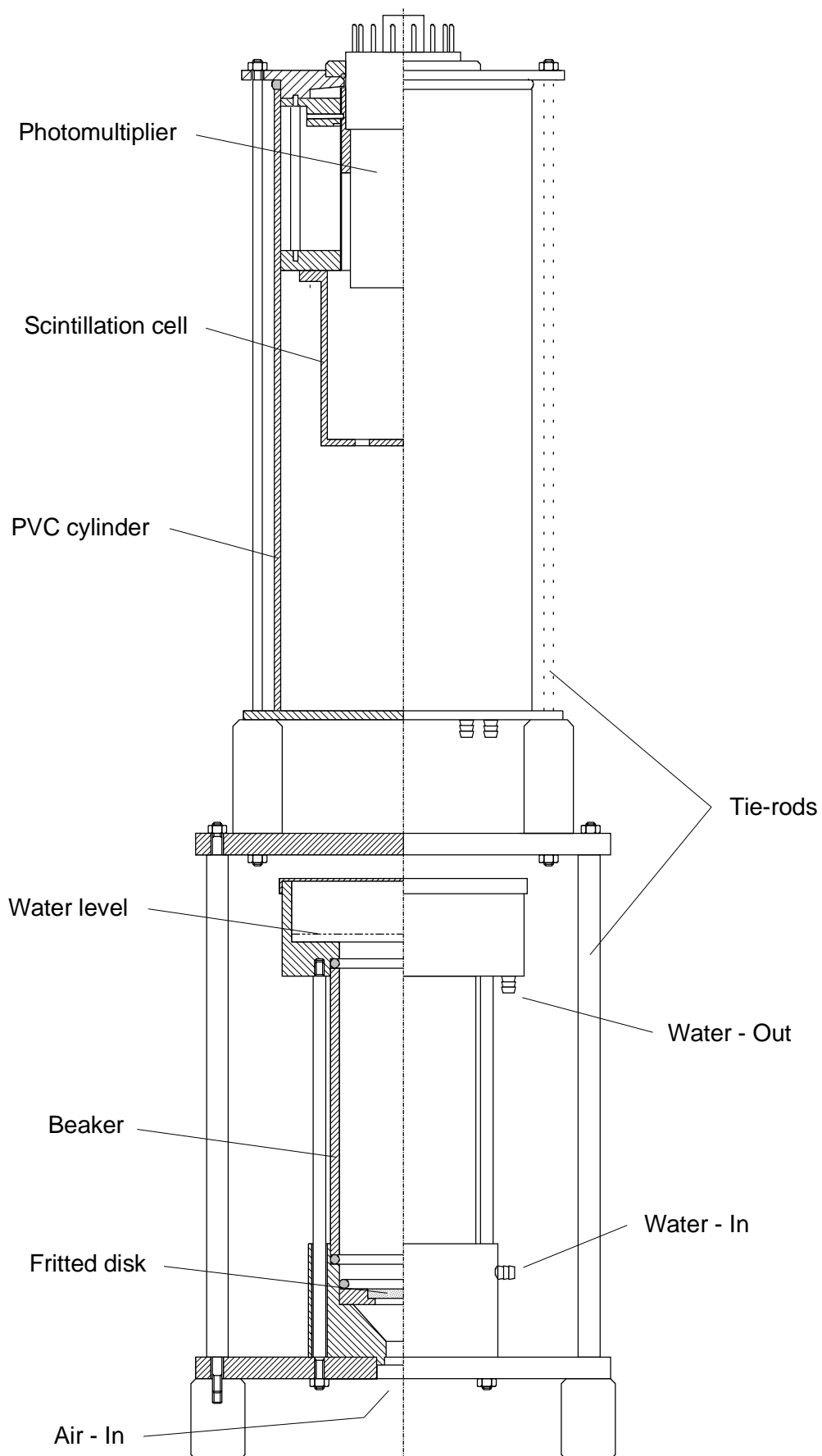
With a partial vacuum of 0.8 bars, a re-entry of around 2.3 litres (STP conditions) is sufficient to obtain complete radon degassing within the solution (Lucas & Markun, 1988). In mixing with the environmental air within the cylinder, this degassed air, vapour saturated, becomes a non saturated mixture, thus preventing water condensation on the cell walls and on the photo-multiplier window.

After approximately three hours, the counting of the scintillation produced by the  $\alpha$  decay from  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{218}\text{Po}$  and  $^{214}\text{Po}$ , is performed. At the end of the counting, the data are recorded and the cycle may be repeated.

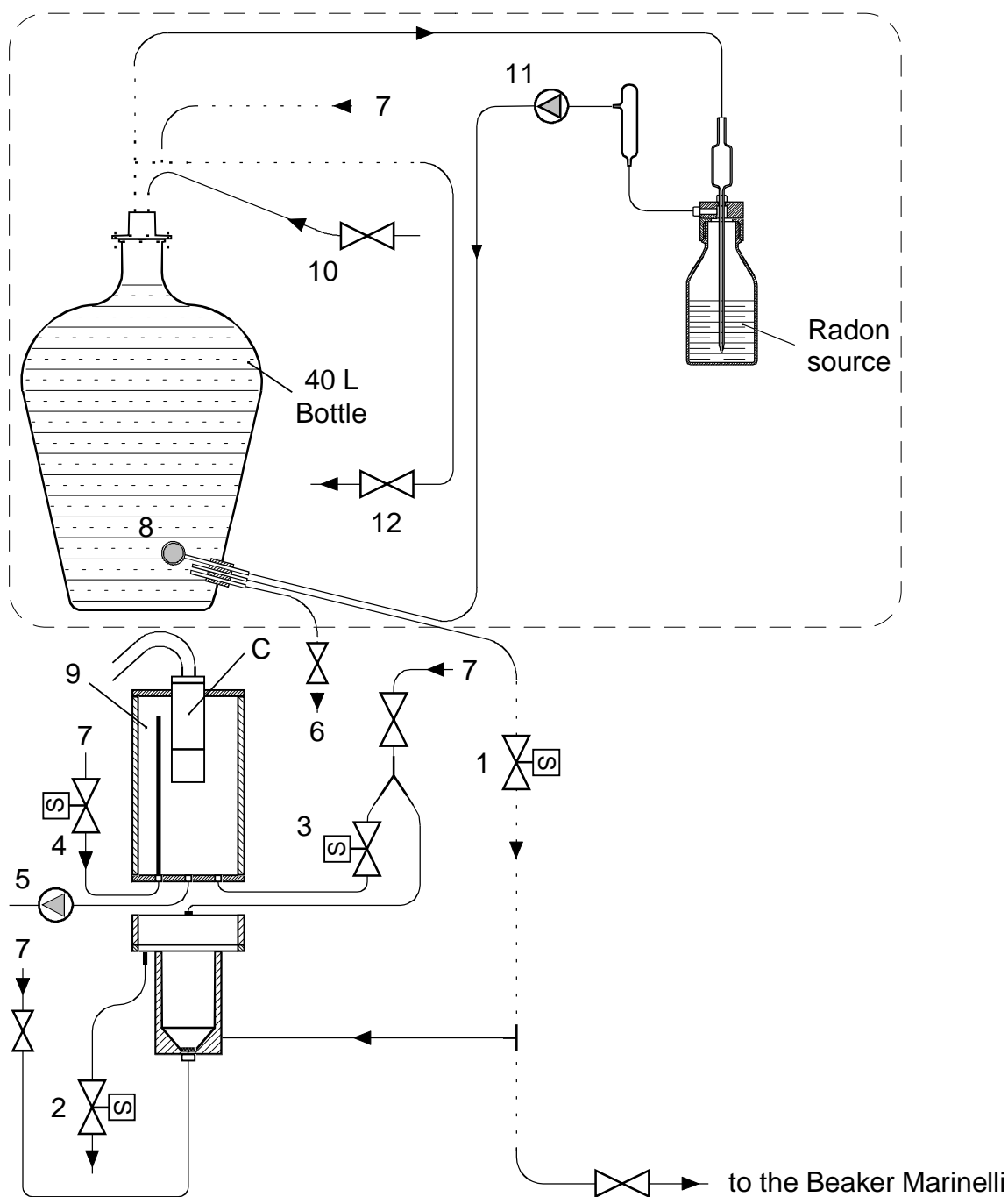
The electronic chain is made up by an amplifier, a discriminator, and by a counting scale device GPC-1 (*Thesys & Technology trademark, Milan Italy*), which allows registration of the relative data up to a maximum of 999 measuring cycles. This counting scale may be linked, by a serial port, with a PC for a further data elaboration (i.e., by some output signal manipulation to the GMS II remote station PC computer). The photo-multiplier (*Hamamatsu R1306 trademark, Japan*) is coupled with a 2”x 2” Na(Tl) scintillator with power supplied by a high voltage device (*Hamamatsu C4710-51 trademark, Japan*).

The high voltage device, vacuum pump, amplifier, discriminator and the counting scale device are powered by 12V DC. Only the Electro-valves are powered by 24V DC, with buffer batteries to avoid the interruption of the measurement cycles, in case of (even prolonged) power supply failure.

The system finally realised at the DINCE laboratory, ultimately to be located in a remote station chosen under the GSZ and AGMV EC funded programs, was calibrated and tested at DINCE over many months, following the schedule in Fig. 9.



**Figure 8:** Radon continuous monitor assembly excluding the hydraulic scheme, detailed in Figure 9

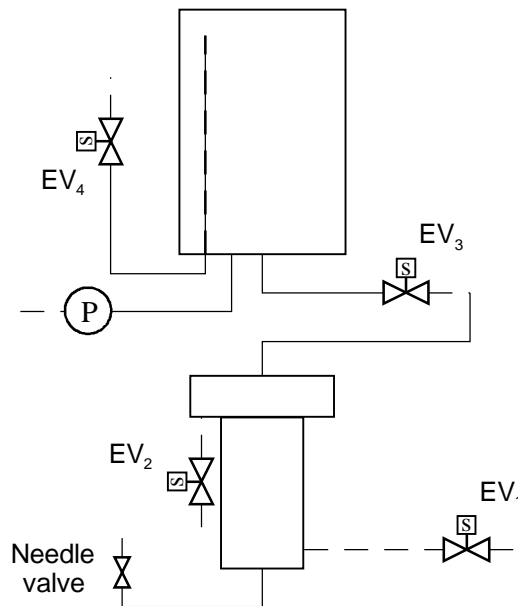
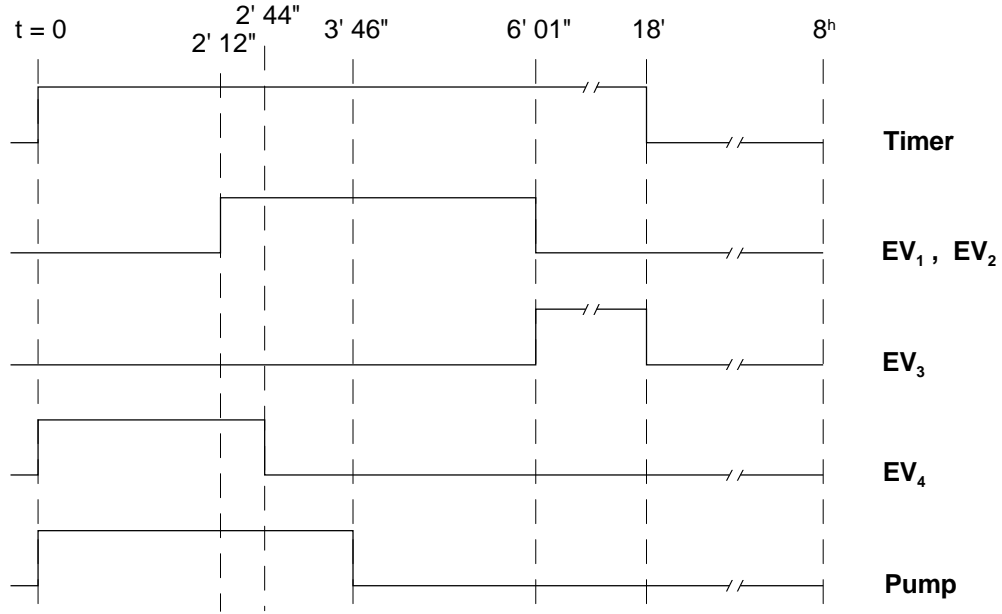


**Figure 9:** Hydraulic scheme of the radon continuous monitor: C = Lucas Cell coupled with the photo-multiplier; EV = Electro-valve (S = solenoid type); 1) Water Inlet EV; 2) Water outlet EV; 3) Degassing EV; 4) Air Inlet EV; 5) Vacuum Pump; 6) Tank-bottle emptying; 7) External air inlet; 8) Fritted disk; 9) PVC cylinder; 10) Tank-bottle refilling; 11) Membrane pump; 12) Air outlet.

In the upper panel of the figure the water source is shown, consisting of a large capacity tank (40 litres). The water was enriched by radon by way of an air re-circulation auto-serve routine. A membrane pump with a nominal flow of 2.5 L/min was used to draw off the residual air at the top of the tank and to convey it to a cruet, where bubbles in an acidic solution with around 30,000 Bq of  $^{226}\text{Rn}$  were added. The mixture was then re-entered through a fritted disk near to the bottom of the tank, remaining partially in solution within

the tank itself. Consequently, the aliquot of water (around 40 litres) was sufficiently enriched by radon to perform up to ten measuring cycles.

In Fig. 10. the typical temporal trends recorded during the tests are reported. A timer drives the measuring cycle sequence, and during the ON condition of each cycle, (lasting 18'), scheduled relays are switched following the above-mentioned temporal steps, managing both the pump and the electro-valves. The relays are powered by 24V DC, with a buffer battery to avoid interruption within the measuring cycles in the event of power failure.



**Figure 10:** Stages of the measurement cycle. Activation logic;  
EV = Electro-valve (S = solenoid type).

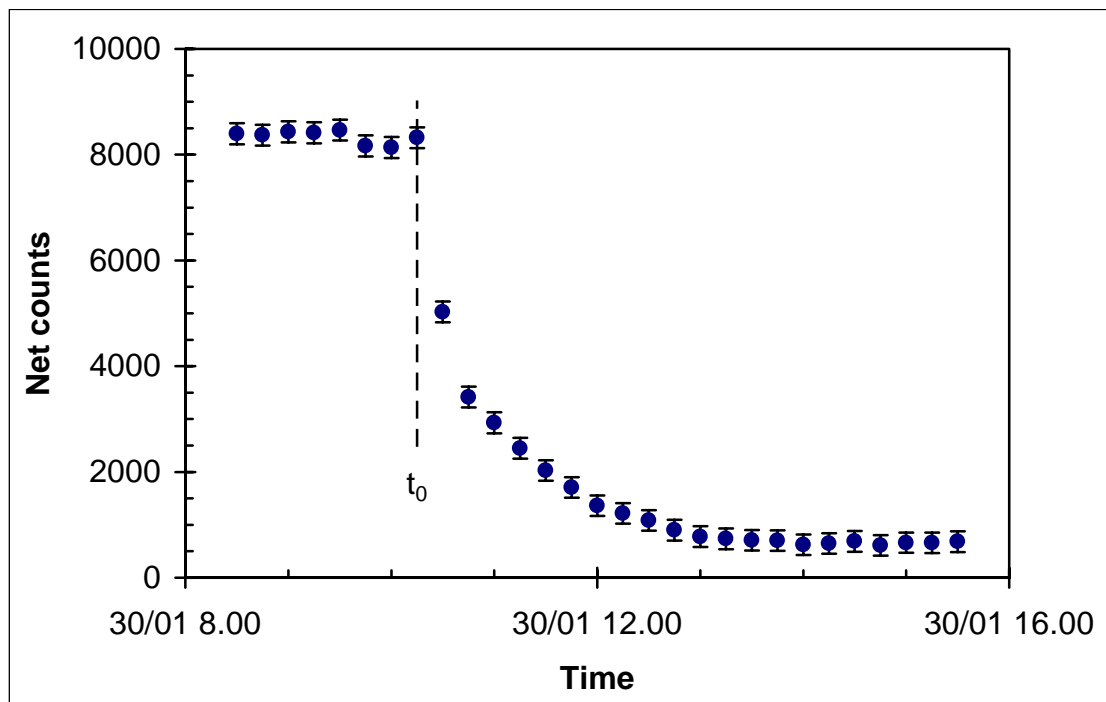
In every cycle, it is possible to take a sample with an already calibrated Marinelli Beaker (BM), with a volume of 0.69 litres, making it possible to measure the radon concentration,



also by discrete  $\gamma$  spectrometry measurements and to periodically calibrate the  $\alpha$ -scintillation continuous monitoring system. By following this procedure, in this initial performance we quantitatively evaluate an *efficiency* of  $7.52 \pm 0.29$  cpm (counts per minute) for each Bq/L.

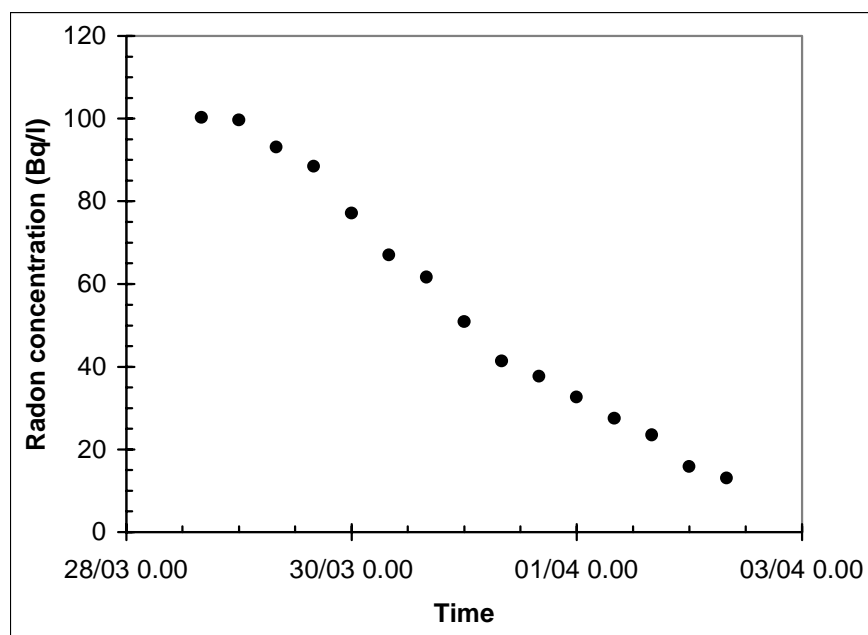
In analysing all the data gathered during the successive measurement cycles, it was possible to infer a *mean efficiency* of  $7.79 \pm 0.13$  CPM for each Bq/L. This datum infers a sensitivity approximately 3.5 times greater than that of the Noguchi & Wakita (1977) prototype, and 25 times higher than those of the Chinese prototypes developed during the seventies. This performance is very useful when considering the low radon concentration in some seismically active areas of Italy, which are potentially interesting for radon monitoring,

In a preliminary stage, we wished to verify the efficiency of the “zero point” (reset performance), by an external environment air re-circulation step at the beginning of each cycle. Fig. 11. reports the temporal trend of the counting over an eight hour period, obtained sequentially every 15 minutes, using the scintillation cell and the air degassed from a water sample enriched by radon up to 100 Bq/L. At the time  $t_0$ , removal of the water within the beaker was performed using water drawn from the municipality supply: spanning a few hours, the count value drops to correspond with a radon concentration of around 5 Bq/L.



**Figure 11:** Effects on counting due to air circulation inside the PVC cylinder.  
The net counts have been recorded during a 15 minute interval.

In Fig. 12 the values of radon concentration gathered by sequential drawings off from the tank are shown. The measures are recorded every 8 hours, twice during the day (8:00 AM and 4:00 PM) and once during the night (2:00 AM). Within table 1, the radon concentration values, in relation to the diurnal cycles shown in Fig. 12, are listed and compared with the concentration values obtained by the samplings performed concurrently with the BM (0.69 litres volume). The concentration values refer to the time of sampling.



**Figure 12:** Plot of radon concentration within the tank-bottle.  
Errors related to the data are shown in table 1.

Drawing off time	Radon concentration (Bq/l)	
	Lucas Cell	Beaker Marinelli
28/03 16.00	100 ± 4	108 ± 4
29/03 8.00	93 ± 3	88 ± 4
29/03 16.00	88 ± 3	85 ± 4
30/03 8.00	67 ± 3	63 ± 3
30/03 16.00	62 ± 2	57 ± 2
31/03 8.00	41 ± 2	41 ± 2
31/03 16.00	38 ± 1	37 ± 2
01/04 8.00	27 ± 1	26 ± 1
01/04 16.00	23 ± 1	23 ± 1
02/04 8.00	13 ± 1	9 ± 1

**Table 1:** Comparison between the concentration values (Bq/L) gathered by the Lucas Cell and by the Beaker Marinelli (γ Spectrometry method), at the “drawing off time”.

## Conclusion

In considering firstly, the reviewed experience gathered during the last few decades in the design, realisation and testing of radon monitors, primarily adopting  $\alpha$ -scintillation cell methods, and secondly, our radon monitor prototype, it is possible to conclude the following.

The earlier prototypes using the  $\alpha$ -scintillation methods, either operating in discrete or continuous mode, have shown a common major source of error in the radon measurement: with the flushing efficiency showing variations from 30% to 45%, up to 75%, across the systems reviewed.

In the *water-air stripping* techniques, it is important to keep the water-flow and the air-flow rates constant, together with the air/water ratio in the separation chamber/device/container. This problem could be partially overcome by minimising fluctuations in the gas/water ratio, i.e. by adopting a double headed peristaltic pump (Quattrocchi et al., 1997), with different size/flow tubes to keep the water/air ratio constant. However, this solution is not available if we prefer a “quasi continuous mode” of operation.

Our chosen *semi-continuous flushing device* seeks to avoid the differential stripping of radon in ascending bubbles, typical of the other discussed *continuous flushing devices* where selection of the proper air/water ratio remains critical for each peculiar situation, considering the important balance of two effects: reducing the air/water ratio increases the radon concentration within the smaller volume, whereas increasing the air/water ratio improves the stripping efficiency.

The choice of a “quasi continuous mode” (1 datum every three hours at least) arises from the evidence of a very low  $\alpha$ -counting *background* build up when using this method, if the groundwater maintains a low-medium radon concentration ( $\sim < 150$  Bq/L), as also inferred by other Authors (i.e., 1.5 %, see in Teng & Sun, 1986; Noguchi & Wakita, 1977). A “quasi continuous mode” can be built however without the application of a complicated scheduled temporisation system, i.e., inducing vacuum steps or pause steps to cut the  $\alpha$ -background, as chosen by Bella et al. (1993). Our chosen method of operation has other advantages such as independence from pumping-linked troubles (since the known influence of well/spring pumping on the precision and accuracy of the continuous monitoring signal, and the arising of false anomalies linked to the pumping stages) and an absolute calibration facility, when considering that radon and daughters are not in radioactive equilibrium when a continuous *run-through-system* is used.

Moreover, the choice of our  $\alpha$ -scintillation technique was driven by the low concentration detection limits required throughout the greater part of Italy’s seismic and volcanic risk areas (i.e., Umbria and Etna).

The common occurrence of flow-chemistry related problems with hot springs/wells, as a consequence of ongoing corrosion and mineral precipitation processes ( $H_2S$  and  $CO_2$  presence and groundwater hardness), could be simply overcome by periodical renewal of the  $\alpha$ -scintillation cell in our prototype.

Another aspect under consideration, was the selection of radon sensitive sites most suitable for the installation of radon continuous monitors. Our prototype fits well with the choice that seems at present to be the most suitable site for radon monitoring: artesian wells in the vicinity of an active fault zone, and especially in the presence of multi-layered aquifers with differing radon content (mixing processes triggered by ongoing stress field variations). The most important prerequisite for a correct radon continuous monitoring system (either adopting  $\alpha$ -scintillation methods, or others), is for the presence of additional physic-

chemical, chemical, hydro-geological and environmental parameters, to be on line simultaneously in a multi-parametric approach. This approach is very rare in the literary perspective and in that sense, the GMS II prototype - including the radon monitor “sensor” - could represent a new line of research devoted to environmental risks surveillance (Quattrocchi et al., 1999). In our configuration, the radon monitor device is not the fulcrum of the multi-parametric system (as for i.e., CRM and EPOS1 monitors), but a “channel”; therefore the discussed radon prototype has been conceived as a “sensor-channel”, with final analogic output linked to the GMS II acquisition system.

The choice of the 1 data / 3 hours (variable) fits well with recorded radon anomalies when linked to the ongoing seismo-volcano-tectonics in various forms, ranging from hourly spike-likes to long-term trends. The spike-like radon anomalies, if proven valid, may be useful for imminent seismic-volcanic prediction, whereas other methods (strain, tilt, GPS, seismic sequences, etc...) may be useful for long term and intermediate term prediction.

**Acknowledgements:** We thank the DGXII of the EC Commission for the two EC funded programs (*Geochemical Seismic Zonation* and *Automatic Geochemical Monitoring of Volcanoes*, Contracts N. ENV4-CT96-0291 and N. ENV4-CT96-0289 respectively) partially funding this work.

## References

- Bella F., Bella R., Biagi P.F., Caputo M., Della Monica G., Ermini A., Pettinelli E. and Sgrigna V. (1993), *Automatic Equipment to monitor groundwater radon*, PAGEOPH, **141**, 125-137.
- Belloni P., Cavaoli M., Ingraio G., Mancini C., Notaro M., Santaroni P., Torri G. and Vasselli R. (1995), *Optimization and comparison of three different methods for the determination of Rn-222 in water*, The Science of the total Envir., **173/174**, 61-57.
- Calcara M. and Quattrocchi F. (1993), *Una nuova stazione di monitoraggio in continuo del <sup>222</sup>Rn nell'area dei Colli Albani: primi risultati*, Proceedings of the XII GNGTS Meeting 1993, Roma, 449-462.
- Cathey L. (1977), *Continuous water borne radon monitoring using ionisation chambers (abstract)*, EOS Trans. AGU, **58**, 534.
- Chung Y. (1985), *Radon variations at Arrowhead and Murrieta springs: continuous and discrete measurements*, PAGEOPH, **122**, 294-308.
- EC Program (1996-98 a), *Geochemical Seismic Zonation (GSZ). Seismic Hazard Zonation: a multidisciplinary approach using fluid-geochemistry methods*, EC Contract N. ENV4-CT96-0291, ECE-DG XII EC Commission, Brussels.
- EC Program (1996-98 b), *Automatic Geochemical Monitoring of Volcanoes*, EC Contract N. ENV4-CT96-0289, ECE-DG XII Commission, Brussels.
- Friedmann H. and Hernegger F. (1978), *A method for continuous measurement of Radon in water of spring for earthquake prediction*, Geoph. Res. Lett., **5**, 7, 565-568.
- Friedmann H. (1991), *Continuous spring water measurements in Austria and possible relations to earthquakes*, Proceedings of the International Conference “Earthquake Prediction: State of Art.”. Strasbourg, Council of Europe, 14-18 Oct. 1991, p. 233-239.

- Friedmann H. (1985), *Anomalies in the Radon content of Spring Water as Earthquake precursors phenomena*, Earth.Pred.Res., **1**, 179-189.
- Friedmann H. (1983), *A portable radonmeter*, Radiation Protection Dosimetry, **4**, 119-122.
- Garavaglia M., Braitemberg G., Zadro M. and Quattrocchi F. (1997), *Radon measurements in soil and waters in the seismic Friuli area*, Il Nuovo Cimento, in press.
- Hauksson E. (1981), *Radon content of groundwater as an earthquake precursor: evaluation of worldwide data and physical basis*, Journ.Geoph.Res., **86**, 9397-9410.
- Heinicke J., Koch U. and Martinelli G. (1995), *CO<sub>2</sub> and radon measurements in the Vogtland area (Germany) - a contribution to earthquake prediction research*, Geoph. Res. Lett., **22**, **7**, 771-774.
- Holub R.F. and Brady B.T. (1981), *The effect of stress on Radon emanation from rock*, Journ.Geoph.Res., **86**, 1776-1784.
- Honkura Y. and Isikara A.M. (1991), *Multidisciplinary research on fault activity in the Western part of the North Anatolian Fault Zone*, Tectonophysics, **193**, 347-357.
- King C.Y. (1985), *Radon monitoring for earthquake prediction in China*, Earth. Pred. Res., **3**, 47-78.
- King C.Y. (1986), *Gas Geochemistry applied to earthquake prediction: an overview*, Journ.Geoph.Res., **91**, 12269-12281.
- King C.Y. (1993), *Radon anomalies on three kind of faults in California*, PAGEOPH., **141**, 111-124.
- Koch U. and Heinicke J. (1996), *Earthquake prediction research by radiometric-geochemical methods in the Vogtland-NW Bohemian region: new results and aspects*, in: *Seismology in Europe, Proceed. of the XXV ESC General Assembly, Reykjavik, 9-14 September 1996*, pp. 2241-246.
- Kristiansson K. and Malmquis L.(1982), *Evidence for diffusive transport of <sup>222</sup>Rn in the ground and a new physical model for the transport*, Geophysics, **47**, 1444-1452.
- Igarashi G., Tohjima Y. and Wakita H. (1993), *Time-variable response characteristics of groundwater Radon to earthquakes*, Geoph.Res.Lett., **20**, **17**, 1807-1810.
- Igarashi G. and Wakita H. (1995), *Geochemical and hydrological observations for earthquake prediction in Japan*, Journ.Phys.Earth, **43**, 585-598.
- Igarashi G., Seaki T., Takahata N., Smikawa K., Tasaka S., Sasaki Y., Takahashi M. and Sano J. (1995): *Groundwater radon anomaly, before the Kobe earthquake in Japan*, Science, **269**, 60-61.
- Li T. and Yang G. (1978), *Manufacture and application of the JSZ-2 type intermittent/continuous digital automatic radon monitor*, in: *Collected Reports in Seismo-Hydrogeochemistry, State Seismological Bureau, Division of Scientific Research, Beijing*, pp. 469-481 (in Chinese).

- Lombardi S., (Project Leader), Billi A., Angelone M., Brunori C. A., Ciotoli G., Di Filippo M., Doumaz F., Duddridge G. A., Funiciello R., Fytikas M., Grainger P., Guerra M., Marty B., Mele G., Montone P., Orlandi C., Papachristou M., Pavlidis S., Pizzino L., Pongetti F., Quattrocchi F., Romeo G., Salvi S., Salvini F., Scarlato P., Sciacca U., Soulakellis N., Taccetti Q., Urbini G. and Zouros N. (1998): *Second Annual Report of the "Geochemical Seismic Zonation" EC Program*, EC Contract N. ENV4-CT96-0291, ECE-DG XII, Brussels., Belgium.
- Lucas H.F. and Markun F. (1988), *Radon in air calibration procedure: a primary method*, Nuclear Science and Engineering, **99**, 82-87.
- Mancini C. and Giannelli G. (1995), *Determination of waterborne  $^{222}\text{Rn}$ , using AC canisters*, Health Physics, **69**, 408-410.
- Mancini C., Quattrocchi F., Guadoni C., Pizzino L. and Porfidia B. (1998):  *$^{222}\text{Rn}$  study during the geochemical surveillance of some seismogenic areas: comparison between different techniques for discrete monitoring*, Annali di Geofisica, accepted.
- Megumi K. and Mamuro T. (1987), *Radon and Thoron exhalation from the ground*, Journ.Geoph.Res. **78**, 804-1808.
- Melvin J.D., Shapiro M.H. and Copping N.A. (1978), *An automated Radon-Thoron monitor for earthquake prediction research*, Nucl. Instrum. Methods. **153**, 239-251.
- Mendenhall M.H., Shapiro M.H., Melvin J.D. and Tombrello T.A. (1981), *Preliminary spectral analysis of near-real time radon data*, Geoph.Res.Lett., **8**, 5, 449-452.
- Mjachkin V.I., Brace W.F., Sobolev G.A. and Dieterich H.J. (1975), *Two models for earthquake forerunner* PAGEOPH, **113**, 169-181.
- Noguchi M. and Wakita H. (1977), *A method for continuous measurement of Radon in groundwater for earthquake prediction*, Journ.Geoph.Res., **82**, 1353-1357.
- Okabe S. (1956), *Time variation of the atmospheric radon content near the ground surface with relation to some geophysical phenomena*, Mem.Coll.Sci.Univ.Tokyo, **28**, 2 (Ser.A), 99-115.
- Quattrocchi F., Calcara M., Pongetti F., Romeo G. and Sciacca U. (1996), *Evoluzione verso il II prototipo di sistema di monitoraggio geochimico (GMS II), per la sorveglianza geochimico-ambientale e per lo studio dei precursori dei terremoti*, Proceedings of the XV GNGTS Meeting, CNR-Rome, p. 437-442.
- Quattrocchi F., Calcara M. and Porfidia B. (1997 a), *A prototype radonmeter for seismic surveillance*, Annali di Geofisica, **40**, 6, 1599-1611.
- Quattrocchi F., Guerra M., Pizzino L. and Lombardi S., (1997 b). *Radon and Helium as pathfinders of fault system and groundwater evolution in different Italian areas*. Il Nuovo Cimento, in press.
- Quattrocchi F. and Calcara M. (1997), *Test-sites for earthquake prediction experiments. within the Colli Albani region*, Physics and Chemistry of the Earth, in press.
- Quattrocchi F., Di Stefano G., Pizzino L., Pongetti F., Romeo G., Scarlato P, Sciacca U., Urbini G. (1999). *Geochemical Monitoring System II prototype (GMS II) installation at the*

*"Acqua Difesa" well, within the Etna region: first data*, Submitted to Jour. of Volcanol. Geotherm.Res.

- Sadowsky M.A., Nersesov I.L., Nigmatullaev S.K., Latynina L.A., Lukk A.A., Semenov A.N., Simbireva I.G., Ulomov V.I. (1972), *The processes proceeding strong earthquakes in some regions of middle Asia*, Tectonophysics, **14**, 295-307.
- Sciacca U. and Quattrocchi F. (1997), *Un nuovo sistema di monitoraggio geochimico (GMS II) per la sorveglianza dei rischi naturali: descrizione del sistema e prestazioni del software*, ING Internal Pubblic., **595**, 13 pp, ING-Roma.
- Scholz C.H., Sykes L.R. and Aggerwal Y.P. (1973), *Earthquake prediction: a physical basis*, Science, **181**, 803-810.
- Schroeder G.L., Hobart W.K. and Evans R.D. (1965), *Diffusion of Radon in several naturally occurring soil types*, Journ.Geoph.Res., **70**, 471-474.
- Shapiro M.H., Melvin J.D. and Tombrello T.A. (1980), *Automated Radon monitoring at a hard-rock site in the southern California transverse ranges*, Journ.Geoph.Res., **85**, 3058-3064.
- Shi H. and Cai Z. (1986), *Geochemical Characteristics of underground fluids in some active fault zones in China*, Journ.Geoph.Res., **91**, 12282 - 12290.
- Smith A.R., Bowman H.R., Mosier D.F., Asaro F., and Wollenberg H.A. (1976), *Investigation of radon 222 in subsurface waters as an earthquake predictor*, Trans.Inst.Elec.Electronic Eng., Trans Nucl.Sci., **23**,694-698.
- Soonawala N.M. and Telford W.M. (1980), *Movement of radon in overburden*, Geophysics, **45**, 1297-1315.
- Streil T., Heinicke J., Koch U., Oeser V. and J. Wiegand (1997), *EPOS1 - a multi-parameter measuring system to earthquake prediction research*, SARAD GmbH, internal report, Pesterwitz/Dressden, Germany
- Sun L.F. and Teng T.L. (1983), *Development and deployment of Continuous Radon Monitors (CRM's)*, Trans. Am. Geoh. Un., **64**, 101-112.
- Talwani P., Moore W.S. and Chiang J. (1980), *Radon anomalies and micro-earthquakes at Lake Jocassee, South Carolin*, Journ.Geoph.Res., **85**, 3079-3088.
- Tang C. (1978), *Bases for the prediction of the Lungling earthquake and the temporal and spatial characteristics of precursors*, Chin. Geophys., **1**, 400-424.
- Teng T. (1980), *Some recent studies on groundwater radon content as an earthquake precursor*, Journ.Geoph.Res., **85**, 3089-3099.
- Teng T.L. and Sun L.F. (1986), *Research on groundwater radon as a fluid phase precursor to earthquakes*, Journ.Geoph.Res., **91**, 12305-12313.
- Thomas D.M., Cuff K.E. and Cox M.E. (1989), *The association between ground gas Radon variations and geologic activity in Hawaii*, Journ.Geoph.Res., **91**, 12186-12198.

- Thomas D. (1988), *Geochemical precursors to seismic activity*, PAGEOPH, **126**, 37-46.
- Thomas D.M., Cotter J.M. and Holford D. (1992), *Experimental design for soil gas Radon monitoring*, Journ. Radioanal. and Nuclear Chemistry, **161**, 2, 313-323.
- Tiangin Seismological Bureau (Office of Hydrochemistry) (1978a), *Summary of an automatic radon-monitoring method by measuring gamma rays*, in: *Collected Reports in Seismo-Hydrogeochemistry*, State Seismological Bureau, Division of Scientific Research, Beijing, pp. 248-257 (in Chinese).
- Tiangin Seismological Bureau (Office of Hydrochemistry) (1978b), *Summary of tests on FD-128 type automatic radon monitor*, in: *Collected Reports in Seismo-Hydrogeochemistry*, State Seismological Bureau, Division of Scientific Research, Beijing, pp. 482-492 (in Chinese).
- Torgersen T., J. Benoit and D. Mackie (1990), *Control of groundwater Rn-222 concentrations in fractured rock*, Geoph.Res.Lett., **17**, 6, 845-848.
- ULOMOV V.I. and MAVASHEV B.Z. (1967), *A precursor of a strong tectonic earthquake*, Dokl. Acad. Sci. USSR Earth Sci. Sec., **176**, 9-11.
- Varhegyi A., Hakl J., Monnin M., Morin J.P. and Seidel J.L. (1992), *Experimental study of radon transport in water as test for a transportation micro-bubble model*, Journ. Applied Geophys., **29**, 37-46.
- Virk H.S. and Baljinder S. (1993), *Radon anomalies in soil-gas and groundwater as earthquake precursor phenomena*, Tectonophys., **227**, 215-224.
- Virk H.S., and Walia V. and Sharma K. (1995), *Radon precursory signals of Chamba earthquake*, Current Science, **69**, 5, 452-454.
- Virk H.S. and Singh B. (1995), *Correlation of Radon anomalies with the Uttarkashi earthquake*, Mem.Geol.Soc.India, **30**, 125-132.
- Wakita H., (1978), *Earthquake Prediction and geochemical studies in China*, Chin. Geophys., **1**, 443-457.
- Wakita H., Nakamura Y. and Sano Y. (1985), *Groundwater radon variations reflecting changes in regional stress field*, Earth.Predic.Res., **3**, 545-557.
- Wakita H., Nakamura Y., Notsu K., Noguchi M. and Asada T. (1989a), *Radon anomaly: a possible precursor of the 1978 Izu-Oshima-Kinkai earthquake*, Science, **207**, 882-883.
- Wakita H., Igarashi G., Nakamura Y., Sano Y. and Notsu K. (1989b), *Coseismic Radon changes in groundwater*, Geoh.Res.Lett., **16**, 2, 417-420.
- Wollenberg H.A., Smith A.R., Mosier D.F., Flexser S. and Clark M., (1985), *Radon 222 in groundwater of the Long Valley Caldera, California*, PAGEOPH., **1**, 443-457.
- Woith H., Pekdeger A. and Zschau J. (1991), *Groundwater Radon anomalies in space and time: a contribution to the joint Turkish-German earthquake prediction research project*, Proceedings of the International Conference "Earthquake Prediction: State of Art.". Strasbourg, Council of Europe, 14-18 Oct. 1991 pp. 282-289.



Wyss M. (1991), *Evaluation of proposed earthquake precursors*, IASPEI Sub-commission on earthquake prediction, IASPEI Eds., pp.74 .

Zhu K and Wang Y. (1978), *Summary of work on the FD-118 G1 type automatic radon monitor*, in: *Collected Reports in Seismo-Hydrogeochemistry*, State Seismological Bureau, Division of Scientific Research, Beijing, pp. 493-498 (in Chinese).

Zhang W., Shi Y. And Zhang P. (1994), *A new study item of earthquake precursors: the escaping gas Rn in groundwater*, Earthquake Research in China, 8 (1), 39-47.

## **Allegato G.**

### **Alcune considerazioni sull'impiego di collettori a carboni attivi per la misura della concentrazione di $^{222}\text{Rn}$ in aria indoor**

Bollettino dell'Associazione Italiana di Radioprotezione (AIRP), anno XXVI - n. 152.  
Settembre-Ottobre 1999

G. Galli, C. Mancini

#### **Riassunto**

La tecnica dei carboni attivi è diffusamente impiegata nella misura della concentrazione di  $^{222}\text{Rn}$  in aria indoor. Molto spesso non sono tenute presenti alcune caratteristiche che ne dovrebbero condizionare l'impiego e/o che dovrebbero essere tenute presenti nell'analisi e nella diffusione dei risultati.

In questa nota sono puntualizzati alcuni aspetti relativi alla calibrazione, all'esposizione e alle correzioni per l'adsorbimento di umidità ambiente.

#### **Introduzione**

La tecnica dei carboni attivi è ampiamente utilizzata per misure di concentrazione di  $^{222}\text{Rn}$  indoor perché impiega dosimetri economici riutilizzabili dopo rigenerazione, richiede spettrometri gamma già in dotazione in molti laboratori ed è tra le tecniche abilitate dall'EPA [1,2,3].

La relazione che consente la determinazione della concentrazione di  $^{222}\text{Rn}$  è la seguente:

$$C_{\text{Rn}} = \frac{C}{T \cdot D.F. \cdot E \cdot CF} \quad 1)$$

ove

C sono i conteggi netti in un prefissato tempo di misura relativi alla radiazione gamma emessa da  $^{214}\text{Pb}$  e  $^{214}\text{Bi}$ , figli a breve  $T_{1/2}$  del  $^{222}\text{Rn}$  ;

T è la durata dell'esposizione ;

D.F. =  $e^{-0.693t/T_{1/2}}$  tiene conto del decadimento del  $^{222}\text{Rn}$  caratterizzato dal tempo di dimezzamento  $T_{1/2} = 5503$  min. Si assume per t l'intervallo di tempo che intercorre tra il tempo mediano dell'esposizione ed il tempo di misura ;

E è l'efficienza del sistema di rivelazione che si ottiene, nello stesso tempo di misura, con un canestro di calibrazione contenente un'attività nota di  $^{226}\text{Ra}$  in equilibrio con il  $^{222}\text{Rn}$  ;

CF è un fattore funzione dell'incremento di peso (wg) dovuto all'umidità ambiente adsorbita durante l'esposizione

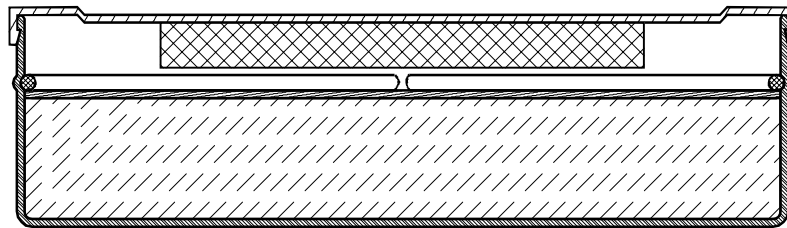
Purtroppo non sono sempre chiari i limiti della tecnica: è frequente il caso di vedere pubblicati dati di concentrazione di  $^{222}\text{Rn}$  indoor in  $\text{Bq/m}^3$  con cifre decimali derivanti da un'analisi statistica limitata ai valori numerici dei conteggi.

In genere non ci si cura se la calibrazione da cui è dedotto il fattore CF è relativa al lotto di canestri usati mentre poi si presta una paranoica attenzione alla doppia pesata (prima e dopo l'esposizione) per la determinazione del wg che porta alla determinazione del valore numerico del CF. Si arriva a fare esposizioni anche di quattro giorni con canestri a configurazione aperta assumendo la concentrazione ottenuta (magari espressa con i decimali) come valore medio nei quattro giorni di esposizione.

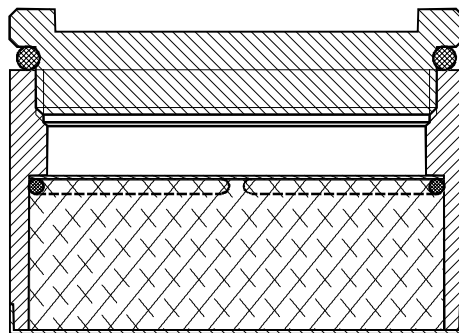
## Calibrazione

I collettori a carboni attivi possono differire per dimensione e peso dei carboni. Quelli considerati dall'EPA in [3] hanno diametro di 10 cm con circa 70 g di carboni in uno strato di spessore di poco inferiore ai 2 cm (Fig. 1).

Sono in uso altri tipi in genere di dimensioni inferiori. In particolare citiamo i collettori messi a punto nel Dipartimento di Ingegneria Nucleare e Conversioni di Energia (DINCE) illustrati in figura 2 con diametro esterno di 6 cm e 20 g di carboni attivi.



**Figura 1** - Collettore a carboni attivi conforme allo standard EPA



**Figura 2** - Canestro DINCE ( $\phi 6$  cm)

A parità di dimensioni ci possono essere differenze dovute al tipo ed alla partita di carboni.

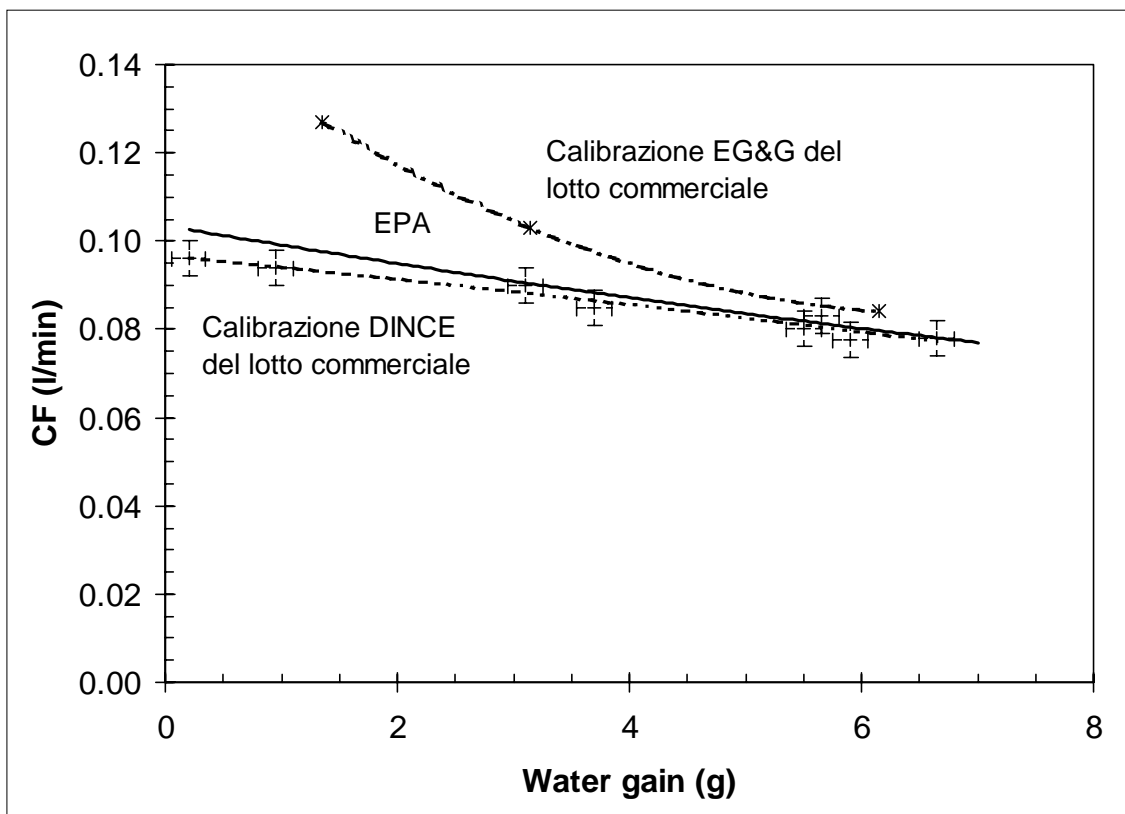
Per questo è sempre raccomandato per ogni lotto di canestri di procedere ad una calibrazione in concentrazioni note di  $^{222}\text{Rn}$  ad almeno tre livelli di umidità (bassa, media, alta) che consentano di ottenere tramite l'eq. (1) la correlazione tra CF e wg in un determinato tempo di esposizione.

I carboni attivi adsorbono il  $^{222}\text{Rn}$  con la legge

$$V = K \cdot P$$

ove  $V$  è il volume del gas adsorbito per unità di massa di carbone,  $P$  è la pressione parziale del gas e  $K$  è il coefficiente di adsorbimento il cui valore tipico è di 4000 Bq per grammo di carboni attivi per ogni  $\text{Bq/m}^3$  di  $^{222}\text{Rn}$  in aria [4]. Quindi l'introduzione di collettori a carboni attivi nella camera di calibrazione porta ad una brusca ed accentuata depressione della concentrazione di  $^{222}\text{Rn}$  tanto più marcata quanto minore è il volume della camera. Per limitare tale perturbazione è necessario usare camere a flusso ove si ha fuoriuscita regolabile (a seconda delle concentrazioni medie volute) dell'aria dalla camera. Tale fuoriuscita deve costituire una perdita di  $^{222}\text{Rn}$  tale da rendere trascurabile la perturbazione introdotta dall'adsorbimento dei carboni immessi nella camera [5].

Solitamente i rivenditori non forniscono curve di calibrazione, talvolta rinviano ad una curva generica pubblicata nel documento EPA [3] oppure fanno riferimento a calibrazioni che possono rivelarsi non pertinenti per quel tipo di canestri. Ad esempio in figura 3 sono mostrate tre curve che danno il CF per esposizioni di 48 ore. La curva i cui punti sono indicati con l'asterisco (\*) è dedotta dai valori forniti da una calibrazione di un certo lotto blu a cui veniva riferito il gruppo di canestri acquisiti dagli autori. La curva i cui punti sono indicati con + (e barre di errore pari a  $1\sigma$ ) è stata ottenuta da calibrazioni effettuate sugli stessi canestri con la camera a  $^{222}\text{Rn}$  in uso presso il DINCE [6,7]. Questo andamento è in completo disaccordo con quanto affermato dal rivenditore ed in buon accordo con la curva dell'EPA mostrata a tratto pieno.



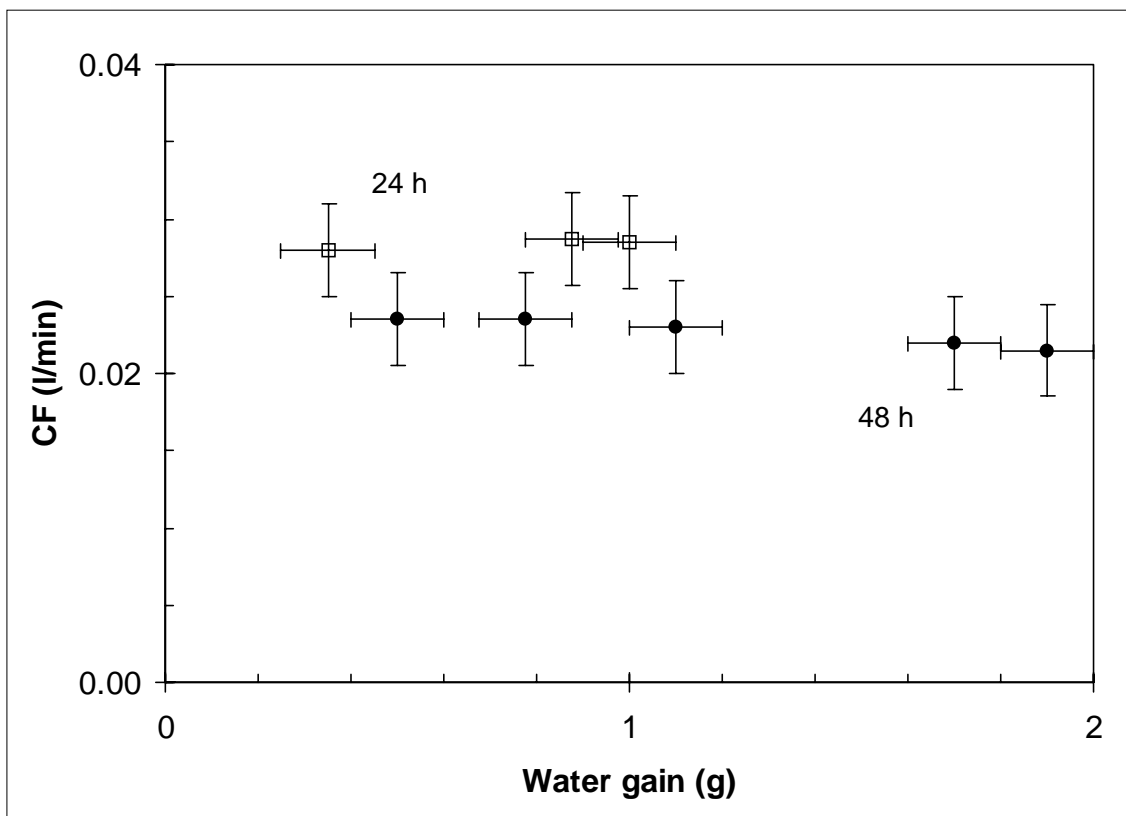
**Figura 3** - CF in funzione del water gain per un tempo di esposizione di 48 h

Come si può notare la differenza tra la curva fornita dal rivenditore e la curva ottenuta con la calibrazione può costituire una fonte di errore consistente soprattutto a basse umidità.

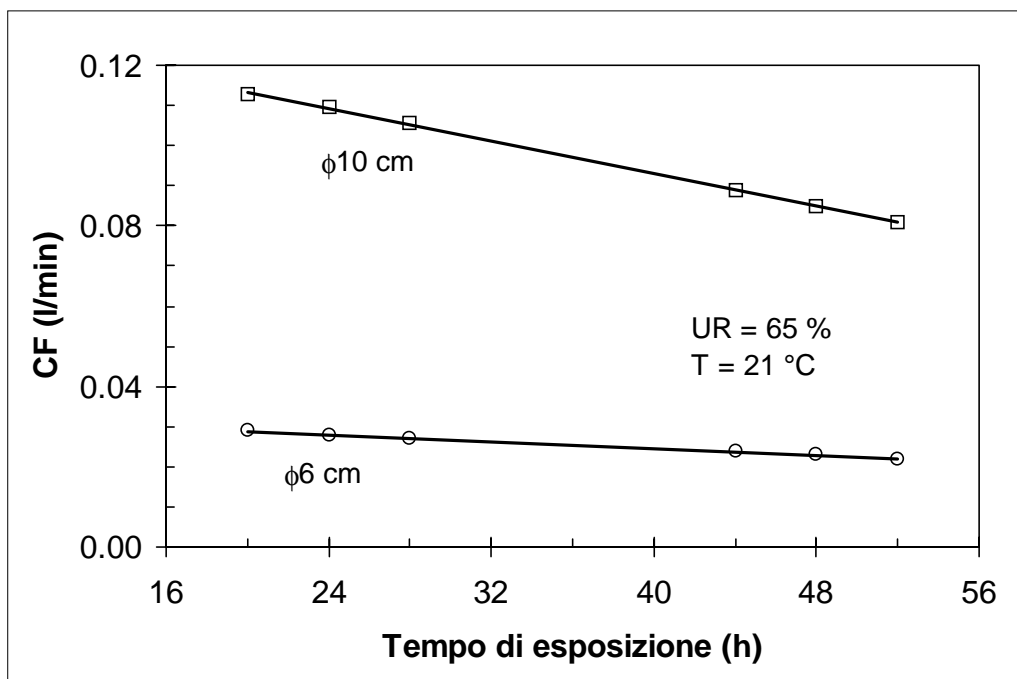
Si noti inoltre che, per il tempo di esposizione di 48 ore consigliato dall'EPA, se si elimina la doppia pesata e si assume per ogni misura il valore di CF corrispondente a un valor medio di wg pari a  $4 \div 5$  g, nelle normali condizioni ambientali si commettono errori su  $C_{Rn}$  inferiori al 10%.

In figura 4 sono riportate le curve di calibrazione per i canestri DINCE per esposizioni di 24 e 48 ore. Anche per tali collettori si noti per esposizioni di 48 ore la scarsa dipendenza del CF dal wg che diviene praticamente nulla per esposizioni di 24 ore.

Le curve in figura 5 danno il CF per tempi di esposizione che si discostano di poche ore da 24 o 48 ore.



**Figura 4** - Fattore di calibrazione CF dei canestri DINCE ( $\phi 6$  cm) al variare del water gain per tempi di esposizione di 24 (quadrati) e 48 ore (cerchi)



**Figura 5** - Andamento del fattore di calibrazione CF dei canestri DINCE ( $\phi 6$  cm) e del lotto commerciale ( $\phi 10$  cm) per scostamenti dai tempi di esposizione di 24 e 48 ore

## Tempi di esposizione

Generalmente le procedure di calibrazione arrivano a fornire dati per esposizioni fino a quattro giorni. Non sono però consigliabili esposizioni superiori a 48 ore. Infatti i carboni attivi non rivelano il  $^{222}\text{Rn}$  ma lo adsorbono. Oltre all'adsorbimento c'è anche il desorbimento caratterizzabile con una costante di tempo  $\tau_{\text{des}}$ . Quindi il  $^{222}\text{Rn}$  adsorbito dai collettori decresce sia per il decadimento, che avviene con una costante di tempo  $\tau_{\text{Rn}}$  e di cui si tiene conto nella (1), sia per il desorbimento.

Si può definire una costante di tempo complessiva  $\tau$  data da

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{\text{Rn}}} + \frac{1}{\tau_{\text{des}}}$$

Quanto più elevata è  $\tau_{\text{des}}$  quanto meno il desorbimento inficia il risultato, ma rendere grande  $\tau_{\text{des}}$  implica diminuire l'efficienza di adsorbimento. Collettori a carboni attivi con  $\tau_{\text{des}}$  (circa 200 ore) tali da rendere possibili esposizioni fino ad una settimana sono quelli a barriera di diffusione [8, 9, 10].

Nei collettori usuali, detti a configurazione aperta, il  $\tau_{\text{des}}$  è di circa 30 ore e quindi  $\tau \cong 24$  ore. Questo porta, già per esposizioni di 48 ore, ad una notevole incidenza sul risultato finale delle variazioni della concentrazione di  $^{222}\text{Rn}$  durante l'esposizione.

Per esempio si consideri un'esposizione di 48 ore con un'attività  $A_1$  adsorbita nelle prime 24 ore ed  $A_2$  nelle seconde 24 ore. Attribuendo l'attività  $A_1$  al tempo mediano delle prime 24 ore, alla fine dell'esposizione si avrà un'attività residua

$$A_{1_{\text{res}}} = A_1 e^{-t/\tau} = A_1 e^{-36/24} \cong 0.223 A_1$$

mentre dell'attività  $A_2$  (attribuita al tempo mediano delle seconde 24 ore di esposizione, ovvero a 12 ore dalla fine dell'esposizione) ne resta



$$A_{2_{\text{res}}} = A_2 e^{-12/24} \cong 0.607 A_2$$

L'attività totale alla fine dell'esposizione è pertanto

$$A_{\text{tot}} = 0.223 A_1 + 0.607 A_2$$

Alla fine dell'esposizione il collettore viene chiuso e l'attività decresce con la legge del decadimento radioattivo

$$A(t) = A_{\text{tot}} e^{-t/\tau_{\text{Rn}}}$$

Supponiamo due situazioni con differenti valori di  $A_1$  ed  $A_2$  ma con  $A_{\text{tot}} = 100$  Bq a fine esposizione:

I<sup>a</sup> situazione :  $A_1 = 2 A_2$

$$100 = 0.223 \cdot 2 A_2 + 0.607 A_2 = 1.053 A_2$$

con  $A_2 \cong 95$  Bq e  $A_1 \cong 190$  Bq

ne consegue un'attività media adsorbita giornalmente di 142 Bq

II<sup>a</sup> situazione :  $A_1 = 1/2 A_2$

$$100 = 0.223 \cdot 1/2 A_2 + 0.607 A_2 = 0.719 A_2$$

con  $A_2 \cong 140$  Bq e  $A_1 \cong 70$  Bq

ne consegue un'attività media adsorbita giornalmente di 105 Bq

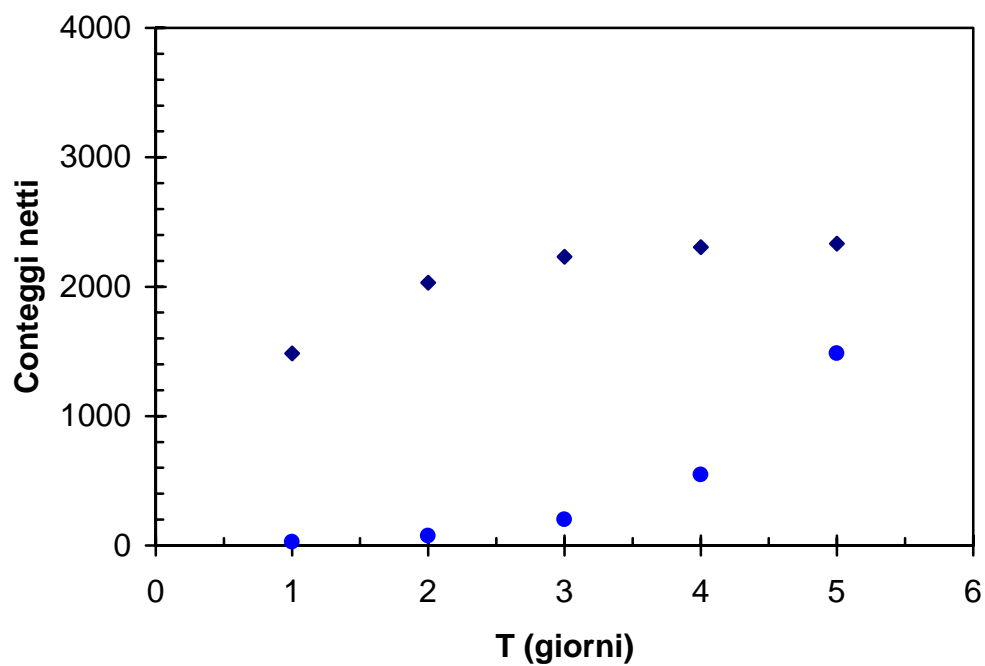
Quindi a pari attività misurata a fine esposizione nel caso I si ha un'attività media giornaliera di circa il 30% più elevata di quella che si deduce nel caso II. Si noti che anche in esposizioni prive di forti differenze di concentrazioni medie tra un giorno ed il successivo una non indifferente differenziazione può esserci se l'esposizione parte dalla sera invece che dal mattino a causa delle tipiche oscillazioni giornaliere della concentrazione di  $^{222}\text{Rn}$  [11]. Ovviamente con tempi di esposizione più lunghi di 48 h si possono avere differenze ancora più marcate.

Da quanto esposto appare evidente che la concentrazione misurata è in gran parte attribuibile all'attività adsorbita nell'ultimo periodo di esposizione ed è alquanto improponibile dedurre da misure effettuate con collettori privi di barriera di diffusione (aperti) concentrazioni medie per esposizioni di  $3 \div 5$  giorni. Ciò è evidente nella figura 6 in cui è riportato l'andamento dei conteggi netti (rombi) al succedersi dei 5 giorni di esposizione a concentrazione costante di  $^{222}\text{Rn}$  e del contributo di ciascun giorno al conteggio finale (cerchi): i primi giorni non danno un contributo apprezzabile. La figura 7 si riferisce invece ai collettori con barriera di diffusione caratterizzati da  $\tau_{\text{des}} \cong 200$  ore ( $\tau \cong 80$  ore): la situazione è nettamente migliore.

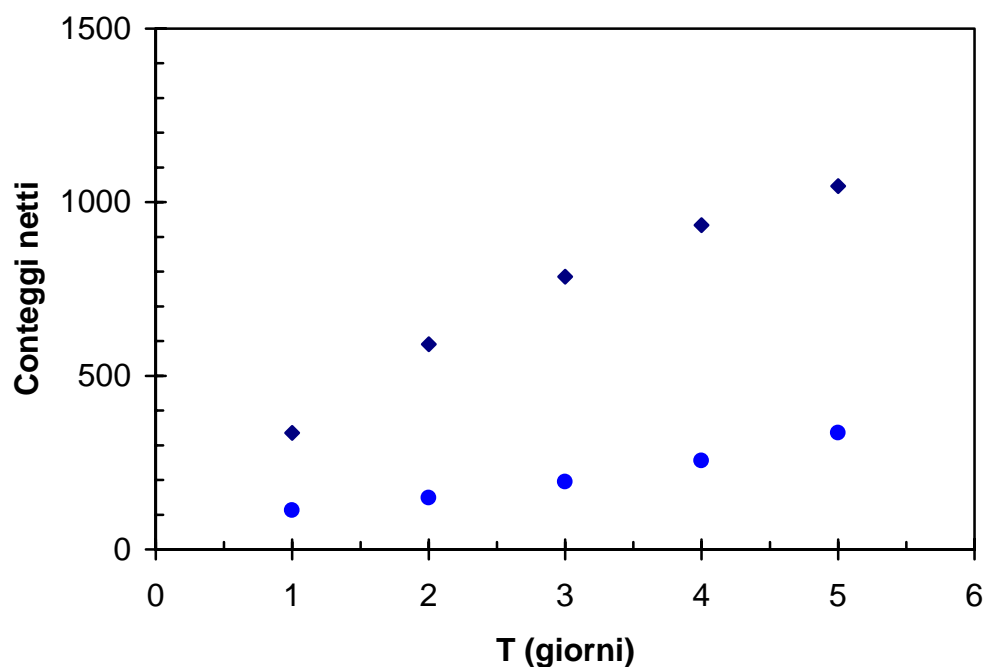
## Conclusioni

Usualmente l'indeterminazione della concentrazione è ottenuta da considerazioni statistiche sui conteggi applicando la propagazione degli errori all'eq. (1) mentre il contributo primario generalmente deriva dalle variazioni, anche notevoli, della concentrazione di  $^{222}\text{Rn}$  durante l'esposizione.

A ciò si può aggiungere l'errore sistematico, talvolta rilevante, che deriva dall'uso di curve di calibrazione che danno CF in funzione di wg non specifiche della partita di canestri usata.



**Figura 6** - Conteggi netti (rombi) al succedersi dei 5 giorni di esposizione a concentrazione costante di  $^{222}\text{Rn}$  e contributo di ciascun giorno al conteggio finale (cerchi) per collettori a carboni attivi in configurazione “aperta”



**Figura 7** - Conteggi netti (rombi) al succedersi dei 5 giorni di esposizione a concentrazione costante di  $^{222}\text{Rn}$  e contributo di ciascun giorno al conteggio finale (cerchi) per collettori a carboni attivi dotati di barriera di diffusione

## Bibliografia

- [1] George A. C. "Passive, integrated measurement of indoor radon using activated carbon". *Health Physics*, 46, pp. 867-872, 1984
- [2] Mancini C., Galli G., Giannelli G. "Misura della concentrazione di radon in aria e acqua mediante la spettrometria gamma". *Acqua Aria*, 2, 1995
- [3] U.S. Environmental Protection Agency. "EERF standard operating procedures for  $^{222}\text{Rn}$  measurement using charcoal canisters". EPA 520/5-87-005, 1987
- [4] Cohen B. L. and Cohen E. S. "Theory and practice of radon monitoring with charcoal adsorption". *Health Physics*, 45, pp. 501-508, 1983
- [5] Cohen B. L. and Nason R. "Radon chamber for calibration of charcoal detectors". *Health Physics*, 51, pp. 135-137, 1986
- [6] Mancini C. "Camera di calibrazione per collettori a carboni attivi". Atti del Convegno Nazionale dell'AIRP: "Isotopi naturali ed artificiali nell'ambiente: aspetti radioprotezionistici e biogeochimici". Maratea, 16-18 settembre 1992
- [7] Procopio M. "Sviluppo e calibrazione di un nuovo tipo di collettori a carboni attivi per la misura della concentrazione di radon in aria ed in acqua". Tesi di Laurea. Dipartimento di Ingegneria Nucleare e Conversioni di Energia dell'Università di Roma "La Sapienza", 1996
- [8] Cohen B. L. and Nason R. "A diffusion barrier charcoal adsorption collector for measuring radon concentrations in indoor air". *Health Physics*, 50, pp. 457-463, 1986
- [9] C. Mancini, G. Galli "Collettori a barriera di diffusione per la misura della concentrazione di Radon indoor". Convegno ARIA 92: La Qualità dell'Aria negli Ambienti Interni, Pisa 28-29 Ottobre 1992
- [10] Cohen B. L. "Performance characteristics of DBCA radon collectors". *Radiation Protection Management*, Vol. 5, No. 6, pp. 47-54, 1988
- [11] Lao K. Q. "Controlling indoor radon. Measurement, mitigation and prevention"

## Allegato H.

### Evoluzione di una miscela costituita da $^{222}\text{Rn}$ e dai suoi prodotti di decadimento

#### H.1. Raggiungimento dell'equilibrio secolare. Trattazione analitica

Si supponga di immettere in un volume  $V$  di riferimento  $N_{0A}$  atomi di  $^{222}\text{Rn}$  al tempo  $t_0 = 0$ . Dopo aver sigillato tale volume si vuole studiare l'evoluzione nel tempo della popolazione costituita dal radon e dai suoi prodotti di decadimento, che si suppongono assenti nell'istante  $t_0$ .

L'andamento nel tempo degli atomi di  $^{222}\text{Rn}$  presenti nel volume  $V$  è governato dalla legge del decadimento radioattivo :

$$N_A(t) = N_{0A}e^{-\lambda_A t} \Rightarrow A_A(t) = \lambda_A N_A(t) = A_{0A}e^{-t/476533} \quad (\text{H.1})$$

avendo indicato con  $[A]$  l'isotopo  $^{222}\text{Rn}$  ed espresso il tempo  $t$  in secondi.

Indicando con  $[B]$  l'isotopo  $^{218}\text{Po}$  si ha :

$$\frac{dN_B(t)}{dt} = \lambda_A N_A(t) - \lambda_B N_B(t) \quad (\text{H.2})$$

da cui, essendo  $N_B(0) = 0$ , si ottiene :

$$N_B(t) = \frac{\lambda_A N_{0A}}{\lambda_B - \lambda_A} (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) \quad (\text{H.3})$$

$$A_B(t) = \lambda_B N_B(t) = \frac{A_{0A}}{1 - \frac{\lambda_A}{\lambda_B}} (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) = 1.000554 \cdot A_{0A} (e^{-t/476533} - e^{-t/264}) \quad (\text{H.4})$$

Analogamente per l'isotopo  $^{214}\text{Pb}$ , indicato con  $[C]$ , si può scrivere l'equazione differenziale :

$$\frac{dN_C(t)}{dt} = \lambda_B N_B(t) - \lambda_C N_C(t) \quad (\text{H.5})$$

da cui, per la (H.4) :

$$\frac{dN_C(t)}{dt} + \lambda_C N_C(t) = 1.000554 \cdot A_{0A} (e^{-t/476533} - e^{-t/264}) \quad (\text{H.6})$$

che ammette come soluzione generale :

$$N_C(t) = C_1 e^{-\lambda_C t} + y_0(t) \quad (H.7)$$

in cui figura la soluzione particolare  $y_0(t)$  del tipo :

$$y_0(t) = B_1 e^{-t/476533} + B_2 e^{-t/264} \quad (H.8)$$

che sostituita nella (H.6) dà :

$$\begin{aligned} & -\frac{B_1}{476533} e^{-t/476533} - \frac{B_2}{264} e^{-t/264} + \frac{B_1}{2320} e^{-t/476533} + \frac{B_2}{2320} e^{-t/264} = \\ & = 1.000554 \cdot A_{0A} (e^{-t/476533} - e^{-t/264}) \end{aligned} \quad (H.9)$$

Uguagliando i due membri si ha :

$$\begin{cases} B_1 \left( \frac{1}{2320} - \frac{1}{476533} \right) = 1.000554 \cdot A_{0A} \\ B_2 \left( \frac{1}{2320} - \frac{1}{264} \right) = -1.000554 \cdot A_{0A} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} B_1 = 2332.495 \cdot A_{0A} \\ B_2 = 298.083 \cdot A_{0A} \end{cases} \quad (H.10)$$

per cui la (H.7) diventa :

$$N_C(t) = C_1 e^{-\lambda_C t} + 2332.495 \cdot A_{0A} e^{-t/476533} + 298.083 \cdot A_{0A} e^{-t/264} \quad (H.11)$$

ove, essendo  $N_C(0) = 0$  :

$$C_1 = -(2332.495 + 298.083) \cdot A_{0A} = -2630.578 \cdot A_{0A} \quad (H.12)$$

per cui si ottiene :

$$A_C(t) = \lambda_C N_C(t) = A_{0A} (1.005449 \cdot e^{-t/476533} + 0.128492 \cdot e^{-t/264} - 1.133941 \cdot e^{-t/2320}) \quad (H.13)$$

Per l'isotopo  $^{214}\text{Bi}$ , indicato con [D], si può scrivere l'equazione differenziale :

$$\frac{dN_D(t)}{dt} = \lambda_C N_C(t) - \lambda_D N_D(t) \quad (H.14)$$

da cui, per la (H.13) :

$$\frac{dN_D(t)}{dt} + \lambda_D N_D(t) = A_{0A} (1.005449 \cdot e^{-t/476533} + 0.128492 \cdot e^{-t/264} - 1.133941 \cdot e^{-t/2320}) \quad (H.15)$$

che ammette come soluzione generale :

$$N_D(t) = C_1 e^{-\lambda_D t} + y_0(t) \quad (H.16)$$

in cui figura la soluzione particolare  $y_0(t)$  del tipo :

$$y_0(t) = B_1 e^{-t/476533} + B_2 e^{-t/264} + B_3 e^{-t/2320} \quad (H.17)$$

che sostituita nella (H.15) dà :

$$\begin{aligned}
& -\frac{B_1}{476533}e^{-t/476533} - \frac{B_2}{264}e^{-t/264} - \frac{B_3}{2320}e^{-t/2320} + \frac{B_1}{1705}e^{-t/476533} + \frac{B_2}{1705}e^{-t/264} + \\
& + \frac{B_3}{1705}e^{-t/2320} = A_{0A} \left( 1.005449 \cdot e^{-t/476533} + 0.128492 \cdot e^{-t/264} - 1.133941 \cdot e^{-t/2320} \right)
\end{aligned} \quad (H.18)$$

Uguagliando i due membri si ha :

$$\begin{cases} B_1 \left( \frac{1}{1705} - \frac{1}{476533} \right) = 1.005449 \cdot A_{0A} \\ B_2 \left( \frac{1}{1705} - \frac{1}{264} \right) = 0.128492 \cdot A_{0A} \\ B_3 \left( \frac{1}{1705} - \frac{1}{2320} \right) = -1.133941 \cdot A_{0A} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} B_1 = 1720.715188 \cdot A_{0A} \\ B_2 = -40.137888 \cdot A_{0A} \\ B_3 = -7298.927239 \cdot A_{0A} \end{cases} \quad (H.19)$$

per cui la (H.16) diventa :

$$\begin{aligned}
N_D(t) = & C_1 e^{-\lambda_D t} + 1720.715188 \cdot A_{0A} e^{-t/476533} - 40.137888 \cdot A_{0A} e^{-t/264} + \\
& - 7298.927239 \cdot A_{0A} e^{-t/2320}
\end{aligned} \quad (H.20)$$

ove, essendo  $N_D(0) = 0$  :

$$C_1 = (-1720.715188 + 40.137888 + 7298.927239) \cdot A_{0A} = 5618.349939 \cdot A_{0A} \quad (H.21)$$

per cui si ottiene :

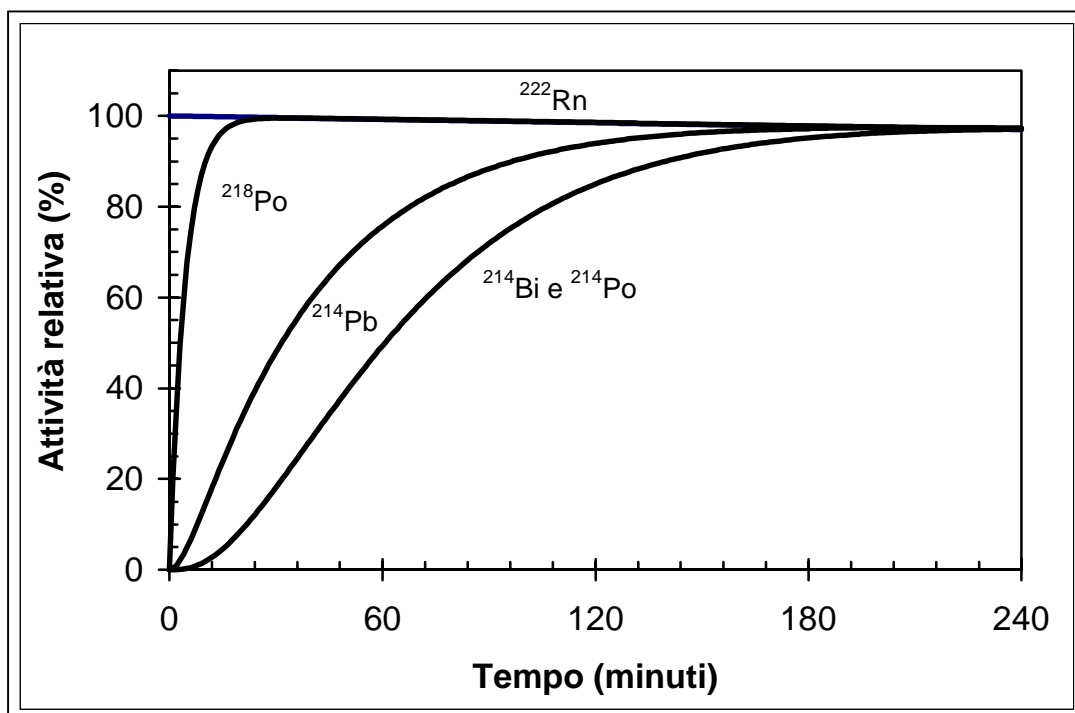
$$\begin{aligned}
A_D(t) = \lambda_D N_D(t) = & A_{0A} \left( 1.009060 \cdot e^{-t/476533} - 0.023538 \cdot e^{-t/264} + \right. \\
& \left. - 4.280229 \cdot e^{-t/2320} + 3.294707 \cdot e^{-t/1705} \right)
\end{aligned} \quad (H.22)$$

Infine per il  $^{214}\text{Po}$ , in virtù del suo brevissimo tempo di dimezzamento (164  $\mu\text{s}$ ), si può considerare valida l'espressione ottenuta per il  $^{214}\text{Bi}$ .

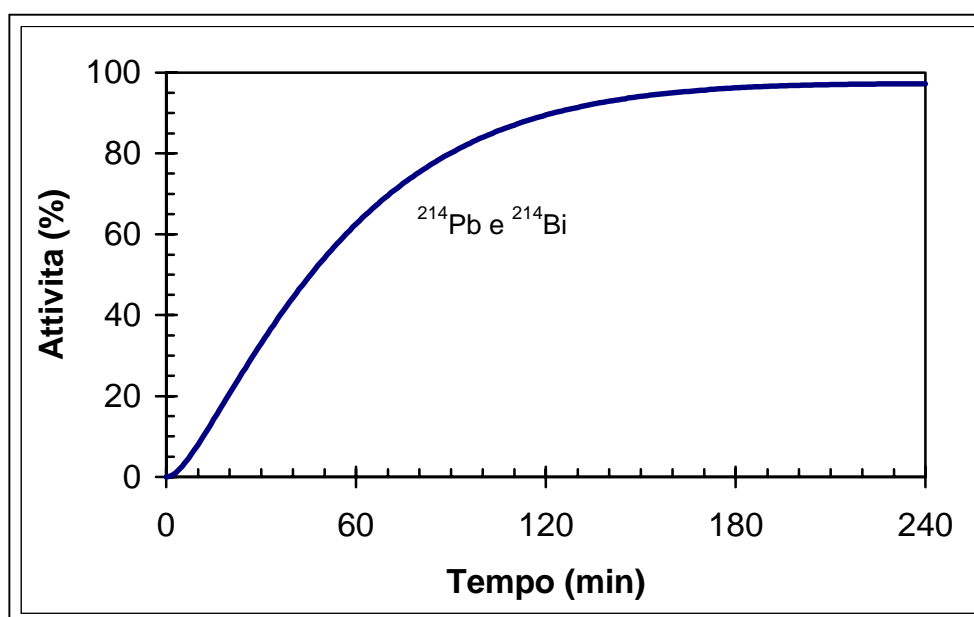
Le (H.1), (H.4), (H.13) e (H.22) sono state graficate in figura H.1. In un sistema isolato si osserva la tendenza al raggiungimento dell'equilibrio secolare tra il radon ed i suoi figli a breve  $T_{1/2}$ .

## H.2. Crescita dell'attività del $^{214}\text{Pb}$ e del $^{214}\text{Bi}$ , emettitori $\gamma$

Le (H.13) e (H.22) relative al  $^{214}\text{Pb}$  e al  $^{214}\text{Bi}$  possono essere combinate e normalizzate per ottenere la curva in figura H.2 in cui è mostrata la crescita dell'attività dei due isotopi nell'ipotesi che nell'istante iniziale non siano presenti figli del radon.



**Figura H.1** - Andamento normalizzato delle attività del  $^{222}\text{Rn}$  e dei suoi figli a breve  $T_{1/2}$  in un sistema isolato



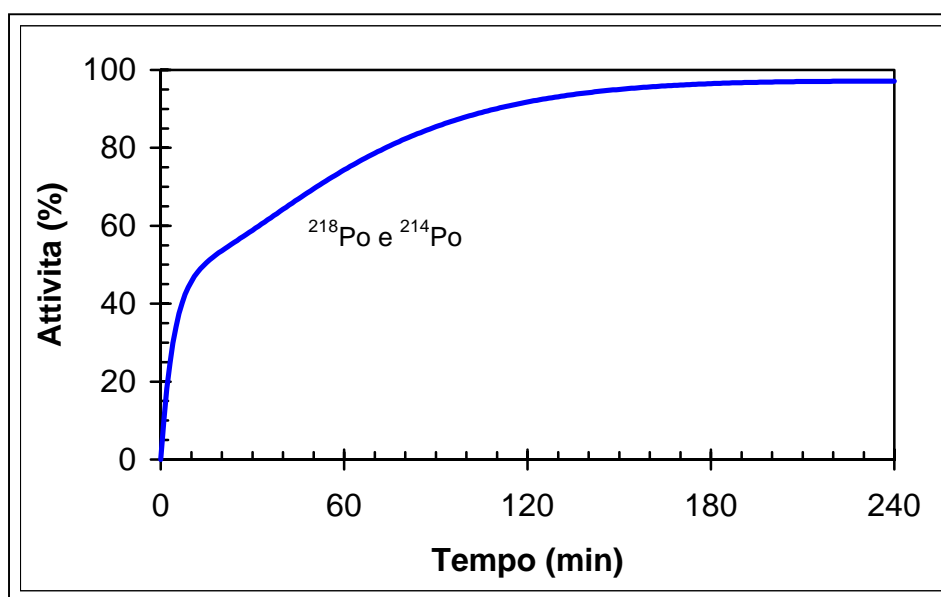
**Figura H.2** - Crescita dell'attività del  $^{214}\text{Pb}$  e  $^{214}\text{Bi}$

### H.3. Risposta teorica di una camera elettrostatica

I figli del radon, prodotti nello stato ionizzato nella catena di decadimenti, vengono



attirati su un rivelatore a semiconduttore per effetto del campo elettrico generato dalla differenza di potenziale esistente tra la parete della camera ed il rivelatore stesso. Vengono rivelate le particelle  $\alpha$  emesse dal  $^{218}\text{Po}$  e  $^{214}\text{Po}$  nell'angolo solido ( $2\pi$ ) visto dal diodo ; pertanto la risposta teorica mostrata in figura H.3 si otterrà combinando e normalizzando le (H.4) e (H.22). È sempre valida l'ipotesi che nell'istante iniziale non siano presenti figli del radon nella camera.

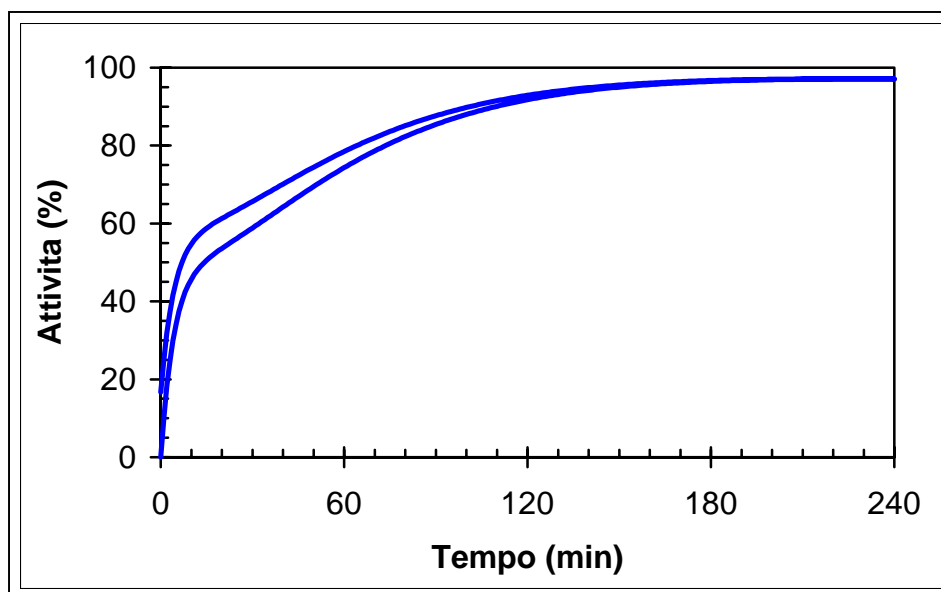


**Figura H.3** - Risposta teorica di un rivelatore a semiconduttore

#### H.4. Risposta teorica di una cella a scintillazione

Come già detto, il segnale prodotto da una cella a scintillazione è dovuto in gran parte all'interazione delle  $\alpha$  prodotte dal decadimento del polonio che ha aderito sullo strato di solfuro di zinco. Sperimentalmente si è trovato che tale contributo ammonta a circa l'80 ÷ 85% del segnale totale prodotto ad equilibrio raggiunto ; alla quota parte rimanente contribuiscono tutti i decadimenti  $\alpha$  avvenuti in prossimità dello scintillatore. Pertanto la risposta di una cella a scintillazione è compresa tra le curve a tratto continuo mostrate in figura H.4 relative a due casi estremi : con la curva inferiore si assume che il rimanente 20% del segnale sia dovuto ancora alle interazioni delle  $\alpha$  prodotte dal polonio, con quella

superiore si assume invece che sia prodotto esclusivamente dalle  $\alpha$  del radon.



**Figura H.4** - Risposta teorica di una Cella di Lucas

### H.5. Evoluzione della miscela dalla condizione di equilibrio a seguito dell'estrazione di radon

Si consideri la miscela costituita da  $^{222}\text{Rn}$  e dai suoi prodotti di decadimento a breve  $T_{1/2}$  in condizioni di equilibrio e si supponga di estrarre tutto il  $^{222}\text{Rn}$  al tempo  $t_0 = 0$ . Dopo aver sigillato nuovamente il volume  $V$  si vuole studiare l'evoluzione nel tempo della popolazione costituita dai figli del radon.

L'andamento nel tempo degli atomi di  $^{222}\text{Rn}$  presenti nel volume  $V$ , per l'ipotesi fatta, è chiaramente nullo :

$$N_A(t) = 0 \quad (\text{H.23})$$

avendo indicato con  $[A]$  l'isotopo  $^{222}\text{Rn}$ .

Indicando con  $[B]$  l'isotopo  $^{218}\text{Po}$  si ha :

$$\frac{dN_B(t)}{dt} = -\lambda_B N_B(t) \quad \Rightarrow \quad N_B(t) = N_{B0} e^{-\lambda_B t} = N_{B0} e^{-t/264} \quad (\text{H.24})$$

essendo  $N_B(0) = N_{B0}$  ed il tempo  $t$  espresso in secondi, da cui si ottiene :

$$A_B(t) = A_{B0}e^{-t/264} \quad (H.25)$$

Analogamente per l'isotopo  $^{214}\text{Pb}$ , indicato con  $[C]$ , si può scrivere l'equazione differenziale :

$$\frac{dN_C(t)}{dt} = \lambda_B N_B(t) - \lambda_C N_C(t) \quad (H.26)$$

da cui, per la (H.25) :

$$\frac{dN_C(t)}{dt} + \lambda_C N_C(t) = A_{0B}e^{-t/264} \quad (H.27)$$

che ammette come soluzione generale :

$$N_C(t) = C_1 e^{-\lambda_C t} + y_0(t) \quad (H.28)$$

in cui figura la soluzione particolare  $y_0(t)$  del tipo :

$$y_0(t) = B_1 e^{-t/264} \quad (H.29)$$

che sostituita nella (H.27) dà :

$$-\frac{B_1}{264} e^{-t/264} + \frac{B_1}{2320} e^{-t/264} = A_{0B} e^{-t/264} \quad (H.30)$$

Uguagliando i due membri si ha :

$$B_1 \left( \frac{1}{2320} - \frac{1}{264} \right) = A_{0B} \Rightarrow B_1 = -297.8988327 \cdot A_{0B} \quad (H.31)$$

per cui la (H.28) diventa :

$$N_C(t) = C_1 e^{-\lambda_C t} - 297.8988327 \cdot A_{0B} e^{-t/264} \quad (H.32)$$

che, essendo  $N_C(0) = \frac{A_{0C}}{\lambda_C}$ , fornisce

$$C_1 = \frac{A_{0C}}{\lambda_C} + 297.8988327 \cdot A_{0B} \quad (H.33)$$

da cui si ottiene :

$$A_C(t) = \lambda_C N_C(t) = (A_{0C} + 0.1284047 \cdot A_{0B}) \cdot e^{-t/2320} - 0.1284047 \cdot A_{0B} \cdot e^{-t/264} \quad (H.34)$$

Per l'isotopo  $^{214}\text{Bi}$ , indicato con  $[D]$ , si può scrivere l'equazione differenziale :

$$\frac{dN_D(t)}{dt} = \lambda_C N_C(t) - \lambda_D N_D(t) \quad (H.35)$$

da cui, per la (H.34) :

$$\frac{dN_D(t)}{dt} + \lambda_D N_D(t) = (A_{0C} + 0.1284047 A_{0B}) e^{-t/2320} - 0.1284047 A_{0B} e^{-t/264} \quad (H.36)$$

che ammette come soluzione generale :

$$N_D(t) = C_1 e^{-\lambda_D t} + y_0(t) \quad (H.37)$$

in cui figura la soluzione particolare  $y_0(t)$  del tipo :

$$y_0(t) = B_1 e^{-t/2320} + B_2 e^{-t/264} \quad (H.38)$$

che sostituita nella (H.36) dà :

$$\begin{aligned} -\frac{B_1}{2320} e^{-t/2320} - \frac{B_2}{264} e^{-t/264} + \frac{B_1}{1705} e^{-t/2320} + \frac{B_2}{1705} e^{-t/264} &= \\ &= (A_{0C} + 0.1284047 A_{0B}) e^{-t/2320} - 0.1284047 A_{0B} e^{-t/264} \end{aligned} \quad (H.39)$$

Uguagliando i due membri si ha :

$$\begin{cases} B_1 \left( \frac{1}{1705} - \frac{1}{2320} \right) = A_{0C} + 0.1284047 A_{0B} \\ B_2 \left( \frac{1}{1705} - \frac{1}{264} \right) = -0.1284047 A_{0B} \end{cases}$$

$$\begin{cases} B_1 = 6431.8699 A_{0C} + 825.882327 A_{0B} \\ B_2 = 40.109315 A_{0B} \end{cases} \quad (H.40)$$

per cui la (H.37) diventa :

$$N_D(t) = C_1 e^{-\lambda_D t} + (6431.8699 A_{0C} + 825.882327 A_{0B}) e^{-t/2320} + 40.109315 A_{0B} e^{-t/264} \quad (H.41)$$

ove, essendo  $N_D(0) = \frac{A_{0D}}{\lambda_D}$  :

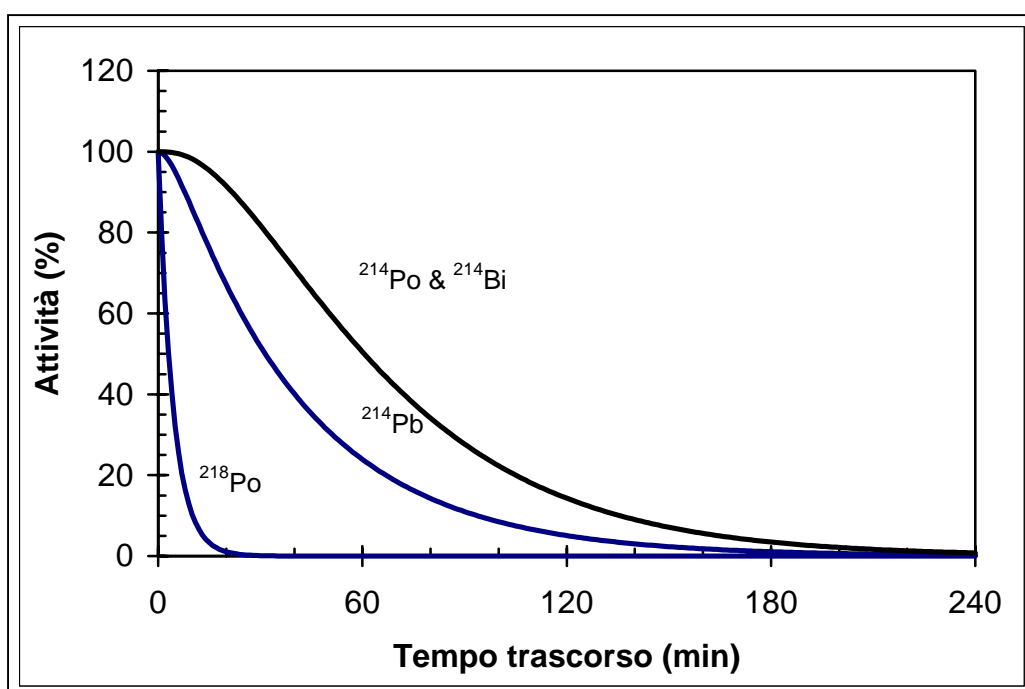
$$C_1 = \frac{A_{0D}}{\lambda_D} - 6431.8699 A_{0C} - 865.9916 A_{0B} \quad (H.42)$$

per cui si ottiene :

$$\begin{aligned} A_D(t) = \lambda_D N_D(t) &= (A_{0D} - 3.7723577 A_{0C} - 0.5079130 A_{0B}) e^{-t/1705} + \\ &+ (3.7723577 A_{0C} + 0.4843885 A_{0B}) e^{-t/2320} + \\ &+ 0.0235245 A_{0B} e^{-t/264} \end{aligned} \quad (H.43)$$

Infine per il  $^{214}\text{Po}$ , in virtù del suo brevissimo tempo di dimezzamento (164  $\mu\text{s}$ ), si può considerare valida l'espressione ottenuta per il  $^{214}\text{Bi}$ .

Le (H.25), (H.34) e (H.43) sono state graficate in figura H.5.



**Figura H.5** - Evoluzione della popolazione isotopica in equilibrio in un sistema isolato a seguito dell'estrazione di radon

# **Allegato I**

## **Software di gestione della scheda multicanale EG&G ORTEC**

*Versione 2.0*

**Realizzato da *Gianfranco Galli***

**Dottorando in Ingegneria Chimica  
dell'Ambiente e della Sicurezza  
XII° ciclo**

**Università degli Studi di Roma  
"La Sapienza"**

**Dipartimento di Energia Nucleare e  
Conversioni di Energia**

## SOMMARIO

SETUP DELL'UTILITÀ DI GESTIONE .....	3
<i>Installazione</i> .....	3
<i>Condizioni per un corretto e razionale utilizzo dell'utilità</i> .....	5
Requisiti hardware .....	5
Files eseguibili necessari al funzionamento dell'utilità .....	5
Caratteristiche e limiti .....	5
Interruzione dell'esecuzione del software di gestione .....	7
Interruzione dell'alimentazione elettrica durante l'esecuzione di un ciclo di misure .....	7
Creazione di un file ROI .....	8
CAPITOLO I .....	9
<i>Prima esecuzione dall'installazione del software di gestione per la scheda multicanale ORTEC</i> ..	9
CAPITOLO II .....	10
<i>Tipica sequenza operativa</i> .....	10
CAPITOLO III .....	31
<i>Altre opzioni del menù di gestione per la scheda multicanale EG&amp;G ORTEC (applicazione MG.EXE)</i> .....	31
CAPITOLO IV .....	33
<i>Altre opzioni dell'applicazione CAE.EXE di ausilio all'acquisizione e gestione dati con la scheda multicanale EG&amp;G ORTEC</i> .....	33
CAPITOLO V .....	38
<i>Conversione in grafico EXCEL di un file riepilogativo di un ciclo di misure</i> .....	38
<i>Conversione in grafico EXCEL di un file MCA riepilogativo di spettro</i> .....	40
MESSAGGI DI ERRORE .....	42
APPENDICE A .....	60
<i>Guida all'impostazione ed esecuzione di un ciclo di misure con il GPC-1</i> .....	60

## SETUP DELL'UTILITÀ DI GESTIONE

### Installazione

Per quanto riguarda l'installazione seguire la seguente procedura:

1. posizionarsi sul disco rigido digitando C: ↵ ;
2. accertarsi del nome della directory in cui è installato il software della ORTEC di gestione della scheda multicanale (generalmente C:\MCA) ;
3. posizionarsi sul disco nel drive A o B digitando A: ↵ oppure B: ↵ ;
4. accertarsi che i files contenuti nel floppy disk di installazione siano integri eseguendo il file batch VALIDA.BAT con il comando

VALIDA ↵

Questo step è facoltativo in quanto tale verifica viene comunque automaticamente eseguita nel corso dell'installazione ;

5. eseguire INSTALL.BAT passandogli come parametri il nome della directory di cui al punto 2 e il nome del drive da cui si sta installando l'utilità. Se ad esempio la directory in questione è C:\MCA e si sta installando dal drive A, allora bisogna eseguire

INSTALL A: C:\MCA ↵

completando così la fase di installazione.

In un primo tempo, come anticipato al punto 4, viene verificata l'autenticità dei files; se l'esito è positivo compare la seguente schermata :



---

**Verifica dei codici CRC in corso**

---

```
ATTESN.EXE CRC code is: X'7C72'.
BOOTMCN.EXE CRC code is: X'6301'.
CAE.EXE CRC code is: X'9D68'.
CALIBRA.EXE CRC code is: X'60ED'.
CE.ROI CRC code is: X'0DD0'.
CHECKCHN.EXE CRC code is: X'4382'.
CRC.COM CRC code is: X'0051'.
EDITOR.EXE CRC code is: X'3048'.
FONDO.EXE CRC code is: X'066D'.
MAKEPLOT.EXE CRC code is: X'B58A'.
MC.EXE CRC code is: X'1C68'.
NULLA.ROI CRC code is: X'26E4'.
OLDVIEW.EXE CRC code is: X'D52D'.
PAUSEN.EXE CRC code is: X'8364'.
PLOTCHN.EXE CRC code is: X'D029'.
RADON.ROI CRC code is: X'744C'.
READ.EXE CRC code is: X'13D9'.
RESPOND.COM CRC code is: X'5FC0'.
SERIESYS.EXE CRC code is: X'702D'.
SER COMM.EXE CRC code is: X'346F'.
SEI START.EXE CRC code is: X'D856'.
SETUPMCS.EXE CRC code is: X'3384'.
```

Premere un tasto per continuare...

e si può procedere. Se l'esito è almeno in parte negativo, in qualche riga appare un messaggio del tipo :

```
MAKEPLOT.EXE CRC code is: X'8186'.
CRC code not as expected.
```

in tal caso si raccomanda di **non** procedere con l'installazione in quanto alcuni files sono stati danneggiati o impropriamente modificati.

**Nota Bene :** Si tenga presente che se nel corso dell'installazione la directory passata come parametro ad INSTALL non viene trovata, a causa di un errore di scrittura del suo nome ad esempio, tutti i files verranno di volta in volta copiati sul disco rigido con un nome corrispondente a quello indicato per tale directory.

## Condizioni per un corretto e razionale utilizzo dell'utilità

### Requisiti hardware

Perché il software possa funzionare bisogna disporre almeno di:

1. CPU 286 Sx 10 MHz;
2. 1.1 MBytes liberi sul disco rigido (3.3 MBytes se viene installato anche il manuale);
3. 640 KBytes di memoria RAM;
4. scheda grafica VGA 256 KBytes

È consigliabile l'utilizzo di un monitor a colori. Come si può notare tali requisiti sono ampiamente soddisfatti da qualunque tipo di personal computer in commercio.

### Files eseguibili necessari al funzionamento dell'utilità

Perché il software possa funzionare al massimo delle sue potenzialità bisogna assicurarsi che siano presenti i seguenti files eseguibili : ATTESA.EXE, BOOTMCA.EXE, CAE.EXE, CALIBRA.EXE, CHECKCHN.EXE, EDITOR.EXE, FONDO.EXE, MAKEPLOT.EXE, MG.EXE, OLDVIEW.EXE, PAUSA.EXE, PLOTCHN.EXE, READ.EXE, SER\_COMM.EXE, SERTESYS.EXE, SETSTART.EXE e SETUPMCS.EXE (il file SER\_ING.EXE sarà disponibile in futuro qualora l'Ing. Romeo dell'Istituto Nazionale di Geofisica rilasci una versione del Pulse Counter adattata al tipo di impulsi generati dall'elettronica connessa ai rivelatori in uso presso il Dipartimento di Ingegneria Nucleare e Conversioni di Energia)

### Caratteristiche e limiti

L'utilità di gestione è in grado di :

1. elaborare fino a 999 reports (files dati in formato testo) e/o spettri (files contenenti informazioni relative all'andamento in multicanale dell'acquisizione). Questo è un limite che deriva dal software della ORTEC ed è relativo al fatto che l'estensione dei files è di tre caratteri al massimo ;

2. gestire 1000 files riepilogativi relativi ad altrettanti cicli di misure ;
3. trattare 500 ROI files, al riguardo si veda il par. relativo alla creazione di un ROI file ;
4. trattare fino a 500 files per directory. Comunque tale valore, che limita implicitamente quanto affermato ai punti 1 .. 3, può essere incrementato qualora necessario e precisamente quando si pensa di lasciare in funzione il sistema per oltre 40 giorni consecutivi con doppia acquisizione (80 giorni per singola acquisizione) per ciclo di durata pari ad 8 ore;
5. presentare fino a 9.999.999 conteggi per canale/misura. Questo deriva dall'utilizzo dell'istruzione PRINT USING la cui riga di comando può comunque essere opportunamente modificata in modo da superare tale limite.

Le cifre di cui ai punti 1, 2, 3 e soprattutto 4, che sono relative alle potenzialità del software, devono tuttavia tenere conto del numero massimo di files che possono essere contenuti in una directory (generalmente 256) su PC di vecchio tipo con sistema operativo MS DOS di versione precedente alla 6. Prestare quindi la massima attenzione a questo particolare se non si vuole correre il rischio di vanificare un ciclo di misure per l'esaurimento della capacità di salvataggio di files.

Evitare di aggiungere files di nome coincidente con quello di reports e spettri nella directory di acquisizione prima dell'elaborazione dati altrimenti verrà generato il seguente messaggio di errore:

```
Non tutti i reports CICLO1L.- & CICLO1G.- sono stati trovati
```

```
Si intende risolvere ogni incongruenza riscontrata (S/N) ? S
```

```
Esequire le opzioni F e G di CAE.EXE, poi rielaborare i dati
```

il problema potrà essere risolto seguendo la procedura descritta nel capitolo IV (Opzioni F e G di CAE.EXE).

Si ricordi che gli unici files da mandare in esecuzione dovrebbero essere CAE.EXE e MG.EXE; sono questi che richiamano gli altri moduli eseguibili, e cioè ATTESA.EXE, BOOTMCA.EXE, CALIBRA.EXE, CHECKCHN.EXE, EDITOR.EXE, FONDO.EXE, MAKEPLOT.EXE, OLDVIEW.EXE, PAUSA.EXE, PLOTCHN.EXE, READ.EXE, SER\_COMM.EXE, SERTESYS.EXE, SETSTART.EXE e SETUPMCS.EXE (il file SER\_ING.EXE non è al momento disponibile). È comunque consentito eseguire CHECKCHN.EXE (si verificherà il contenuto dei files di spettro, qualora salvati, limitatamente alla ROI selezionata), EDITOR.EXE (si creerà il file di comando EXEC.TXT), MAKEPLOT.EXE (si elaboreranno i reports, ossia i files dati salvati in formato testo, per creare un file riepilogativo che consentirà di graficare e stampare in forma tabellare i dati relativi alle misure effettuate), PLOTCHN.EXE (si tratterà un file di spettro ed eventualmente lo si salverà in un formato tale da poterlo elaborare con EXCEL) e SERTESYS.EXE (si potranno scaricare serialmente ed elaborare i dati acquisiti con il General Purpose Counter MOD. GPC 1 della TESYS).

#### Interruzione dell'esecuzione del software di gestione

Se per qualsiasi motivo si desidera interrompere l'esecuzione dell'applicazione e non si è nel menù principale è sufficiente premere *Ctrl-Break* (*Ctrl-Pausa* o *Ctrl-Interr* se la tastiera è italiana). Il software è studiato in modo che non verrà arrecato alcun danno e l'elaborazione dei dati potrà essere ripresa successivamente.

#### Interruzione dell'alimentazione elettrica durante l'esecuzione di un ciclo di misure

Un'eventuale mancanza di alimentazione elettrica per periodi limitati durante l'esecuzione di un ciclo di misure non creerà grossi problemi in quanto, al ritorno dell'energia elettrica, il file di comando EXEC.CMD verrà automaticamente rieseguito con parametri opportunamente corretti ed i files di acquisizione memorizzati in files compressi (per la procedura di ripristino dei dati si rimanda al capitolo II par. 9.1)

### Creazione di un file ROI

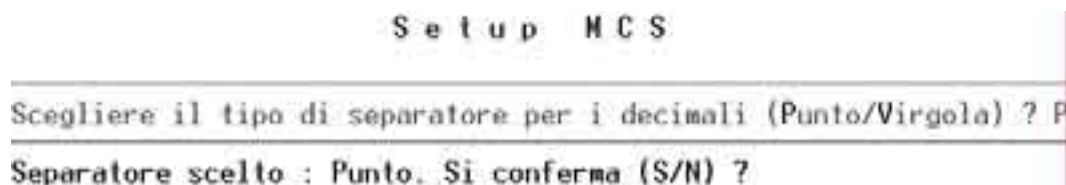
Per evitare di dover interrompere l'esecuzione del programma di utilità è bene disporre in anticipo del file ROI che contiene le informazioni relative al range di canali selezionati per l'integrazione. Segue la procedura per il suo salvataggio (supponendo che la directory di acquisizione ed elaborazione dati sia C:\MCA):

- C: ↵
- CD \ ↵
- CD MCA ↵
- MCA ↵
- Acquisire o richiamare uno spettro tipico dell'isotopo oggetto della rivelazione
- Digitare Alt-4 e posizionarsi sul canale iniziale
- Digitare Alt-R, selezionare BEGIN e spostare il cursore al canale finale
- Digitare Alt-R e selezionare END
- Digitare Alt-R e selezionare SAVE\_FILE. N.B: Il nome deve differire da quello scelto per i files di ciclo di cui al capitolo II, punti 3.9 e 3.10
- Digitare Alt-S e selezionare QUIT
- Digitare Y ↵ alla richiesta Quitting program loses data in buffer...Confirm ? (Y/N) per tornare al DOS

## CAPITOLO I

### Prima esecuzione dall'installazione del software di gestione per la scheda multicanale ORTEC

- 1) Avviare l'applicazione CAE.EXE
- 2) Viene automaticamente selezionata l'opzione K "Imposta il separatore decimale" che esegue l'applicazione SETUPMCS.EXE. Lo scopo è quello di consentire la scelta del separatore dei decimali da usare.



Il formato prescelto dovrà coincidere con quello impostato in EXCEL altrimenti la presentazione dei reports generati (specificatamente dei campi decimali) in una cartella di lavoro risulterà errata. Quando la scelta è stata effettuata comparirà il menù dell'applicazione e si potrà proseguire con la tipica sequenza operativa descritta nel capitolo II.

## CAPITOLO II

### Tipica sequenza operativa

Si suppone che eventuali cicli di misura precedenti siano terminati ed i dati acquisiti già analizzati.

- 1) Avviare l'applicazione CAE.EXE contenuta nella directory C:\MCA. Comparirà il seguente menù

```
— Gestione della scheda EG&G ORTEC e delle comunicazioni seriali —  
A. Calibrazione del processo di acquisizione (scheda EG&G ORTEC)  
B. Determinazione del fondo (scheda EG&G ORTEC)  
C. Avvio del ciclo di misure (scheda EG&G ORTEC)  
D. Impostazione e gestione dati (scheda EG&G ORTEC)  
E. Aggiorna il separatore decimale in un file ARC (scheda EG&G ORTEC)  
F. Converti i files acquisiti in un file compresso (scheda EG&G ORTEC)  
G. Estrai i files acquisiti da un file compresso (scheda EG&G ORTEC)  
H. Elenca i files compressi (scheda EG&G ORTEC)  
I. Cancella un file compresso (scheda EG&G ORTEC)  
J. Verifica i files di spettro acquisiti (scheda EG&G ORTEC)  
K. Gestione delle comunicazioni seriali  
L. Imposta il separatore decimale  
M. Reboot del sistema  
N. Ritorno al DOS  
  
———— Lettera che corrisponde all'opzione scelta : ————
```

- 2) Selezionare l'opzione D "Impostazione e gestione dati"; comparirà un menù di gestione per la scheda multicanale EG&G ORTEC (applicazione MG.EXE)

```
— Menù di gestione per la scheda multicanale EG&G ORTEC —  
A. Crea il file di comando  
B. Compila il file di comando  
C. Elabora i reports  
D. Elabora i files di spettro  
E. Cancella i reports  
F. Cancella i files di spettro  
G. Elenca i files dati riepilogativi  
H. Elenca i files riepilogativi di spettro  
I. Mostra un file dati riepilogativo  
J. Stampa un file dati riepilogativo  
K. Cancella un file dati riepilogativo  
L. Cancella un file riepilogativo di spettro  
M. Esegui l'applicazione CAE.EXE  
N. Ritorno al DOS  
  
———— Lettera corrispondente all'opzione scelta : ————
```

3) Selezionare l'opzione A "Crea il file di comando" ed impostare i seguenti parametri:

3.1) Real time (modalità temporale di acquisizione)

3.2) Tempo di conteggio (secondi)

3.3) Fattore correttivo del tempo di conteggio. Si tiene conto di eventuali imprecisioni commesse dalla scheda multicanale impiegata nel computo del tempo di conteggio.

3.4) Numero di cicli di misura

3.5) Orario di inizio dei cicli di misura, da sincronizzare opportunamente con il timer che gestisce l'elettroidraulica dell'apparato di misura. È raccomandabile impostare sempre tale orario in quanto si abilita il software a riprendere automaticamente il ciclo di misure a seguito di eventuali interruzioni dell'alimentazione elettrica

3.6) Scegliere il modo di acquisizione.

---

Scegliere il modo di acquisizione

1. Conteggio  $\gamma$  con NaI(Tl)
2. Conteggio  $\alpha$  con Cella di Lucas
3. Conteggio  $\alpha$  con Camera Elettrostatica
4. Conteggio  $\alpha$  con Camera Elettrostatica e Cella di Lucas
5. Conteggio  $\alpha$  con Camera Elettrostatica e  $\gamma$  con NaI(Tl)
6. Conteggio  $\alpha$  con Cella di Lucas e  $\gamma$  con NaI(Tl)

---

Imposto la 6ª modalità di acquisizione. Si conferma (S/N) ?

Se il modo di acquisizione prevede una doppia acquisizione per ciclo immettere il tempo di pausa in minuti tra esse

3.7) Impostare il tempo di attesa in giorni, ore, minuti e secondi tra due cicli successivi



- 3.8) Fattore correttivo del tempo di attesa tra acquisizioni di cicli successivi (modalità di acquisizione 1, 2, 3) o del tempo di pausa tra acquisizioni di uno stesso ciclo (modalità di acquisizione 4, 5, 6). Si tiene conto di eventuali imprecisioni commesse nel computo del tempo di sospensione dell'acquisizione, derivanti da problemi relativi al "clock" del sistema o alla scheda multicanale impiegata.
- 3.9) Decidere se salvare o meno i files contenenti gli spettri acquisiti dalla scheda MCA (modalità multicanale). In caso di risposta affermativa decidere se salvarli tutti (P) o soltanto l'ultimo (U) ed immettere il nome del file senza estensione
- 3.10) Per ogni modo di acquisizione decidere se selezionare una ROI su cui integrare. Si raccomanda di rispondere affermativamente in modo tale da abilitare la creazione di reports contenenti il numero di conteggi ottenuto dall'integrazione sulla ROI dello spettro. Si potrà quindi scegliere un ROI file tra quelli mostrati in una lista.



Il ROI file di default (RADON.ROI) è selezionabile premendo semplicemente INVIO ed è adatto per acquisizioni con Cella di Lucas, per gli altri files occorre digitare sia il nome che l'estensione.

Successivamente verrà chiesto se si vogliono salvare i reports. Si consiglia di rispondere affermativamente per poter accedere successivamente ai dati in modalità multiscaler. Immettere il nome dei files di report senza estensione; si deve scegliere un nome differente da quello assegnato agli spettri (se si è deciso di salvarli)

```

Imposto Real Time o Live Time (R/L) ? R
Real Time (in secondi) = 3600
Numero di cicli di misura = 50
Orario di inizio dei cicli di misura (HH:MM:SS) : 16:00:00
Tempo di attesa tra cicli di misura : 0 g 5 h 0 min 0 sec
Salvo files di spettro leggibili da MCA.EXE e PLOTCHN.EXE (S/N) ? S
Nome del file (max 7 caratteri) : SPETTRO
Selezione canali per integrale (S/N) ? S
Files ROI : RADON.ROI (Lucas) e RN-PEAKS.ROI (NaI(Tl))
Salvo informazioni di ciclo in reports leggibili (S/N) ? S
Nome del report (max 7 caratteri) : REPORT
Salvo i reports REPORTL.* e REPORTG.* (S/N) ?

```

3.11) Dalla schermata riepilogativa dei dati immessi decidere se confermare o modificare i dati

```

----- Conteggio  $\alpha$  con Cella di Lucas e  $\gamma$  con NaI(Tl) -----
1. Selezionato Real Time
2. Real Time (in secondi) = 3600
3. Numero di cicli di misura = 50
4. Orario di inizio dei cicli di misura : 16:00:00
5. Attesa tra un ciclo di misura ed il successivo : S
6. Tempo di attesa impostato : 0 g 5 h 0 min 0 sec
7. Files di spettro : SPETTROL.* e SPETTROG.*
8. Files ROI : RADON.ROI (Lucas) e RN-PEAKS.ROI (NaI(Tl))
9. Reports : REPORTL.* e REPORTG.*
----- Si confermano le impostazioni preselezionate (S/N) ? -----

```

Dopo aver confermato le impostazioni si tornerà al menù di gestione

4) Selezionare l'opzione B "Compila il file di comando"

- 5) Selezionare l'opzione M "Esegui l'applicazione CAE.EXE"
- 6) Se si hanno a disposizione almeno 4 minuti di tempo prima dell'inizio della prima acquisizione dei cicli di misure selezionare l'opzione A "Calibrazione del processo di acquisizione". Questo permetterà di apportare correzioni ai tempi di attesa tra cicli successivi e di pausa tra acquisizioni di un stesso ciclo in modo da tener conto dei tempi morti dovuti ad elaborazioni dati ed accessi a disco di lettura/scrittura. L'obiettivo è quello di far sì che il periodo effettivo di un ciclo di misure corrisponda a quello teorico.
- 7) Riavviare l'applicazione CAE.EXE
- 8) Selezionare l'opzione C "Avvio del ciclo di misure".  
Rispondere opportunamente, basandosi sulla frase di aiuto mostrata sullo schermo, alla richiesta di verifica della necessità di rimuovere istruzioni dal file AUTOEXEC.BAT

```
Nel file AUTOEXEC.BAT devono essere contenute esclusivamente istruzioni la cui  
esecuzione termini automaticamente  
Verificare la necessità di rimuovere istruzioni in AUTOEXEC.BAT (S/N) ? N  
Non apro AUTOEXEC.BAT per una sua eventuale modifica. Si conferma (S/N) ?
```

Generalmente tale necessità non c'è; tuttavia rispondendo affermativamente verrà mostrata ogni istruzione contenuta nel file e l'utente potrà decidere quale rimuovere

```
Nel file AUTOEXEC.BAT devono essere contenute esclusivamente istruzioni la cui  
esecuzione termini automaticamente  
Verificare la necessità di rimuovere istruzioni in AUTOEXEC.BAT (S/N) ? S  
LH C:\DOS\SMARTDRV.EXE  
Mantenere questa riga di AUTOEXEC.BAT (S/N) ?
```

- 9) All'orario previsto per il termine delle acquisizioni verrà mostrato il prompt del DOS.  
Nell'eventualità che il ciclo di misure stia continuando deve essersi verificata una

prolungata interruzione dell'alimentazione elettrica e pertanto il numero di cicli pari al valore impostato durante la creazione del file di comando deve essere ancora completato: qualora si desideri interrompere l'esecuzione del file di comando occorre

- a. spegnere il computer;
- b. accendere il computer;
- c. alla comparsa del messaggio

Premere un tasto per interrompere il riavvio del ciclo di misure

entro 5 secondi premere un tasto per interrompere il riavvio automatico del ciclo di misure.

Riavviando l'applicazione CAE.EXE saranno generati output differenti a seconda del fatto che ci siano state interruzioni dell'alimentazione elettrica o meno

- 9.1) L'alimentazione elettrica è venuta a mancare. Si è cercato comunque di completare il numero di cicli impostato; pertanto viene mostrata una schermata riportante data e ora di ogni riavvio automatico del ciclo a seguito di ogni interruzione<sup>1</sup>.

```
L'esecuzione del ciclo di misure è stata ripresa in corrispondenza ad ogni ora e giorno sotto elencati. Pertanto si dovrà procedere manualmente al ripristino della corretta sequenza di acquisizioni (riordinamento di reports e/o spettri) nonché del campo relativo al numero di misure effettivamente completate (modifica dei files CLOCK.DAT ed EXEC.TXT)
```

#### Elenco interruzioni

Ore 23:15:00 del giorno 11/07/1998  
Ore 04:30:00 del giorno 16/07/1998

Premendo un tasto si ritorna al prompt del DOS e si dovrà procedere alla decompressione degli archivi compressi in directories distinte per evitare accidentali sovrascritture; a questo punto, tenendo conto anche di eventuali files non compressi generati dopo l'ultimo riavvio automatico, occorre

<sup>1</sup> In corrispondenza ad ogni interruzione tutti i dati acquisiti (reports e files di spettro) vengono memorizzati nel file compresso BACKUPXX.ZIP, essendo XX un numero progressivo identificativo dell'interruzione, e rimossi dal disco rigido. Ciò impedisce che ad un eventuale successivo riavvio automatico si abbiano sovrascritture e quindi perdita parziale o totale di dati precedentemente acquisiti

- ricreare opportunamente la corretta sequenza numerica delle estensioni dei files relativi a spettri e reports;
- memorizzare nella seconda riga del file CLOCK.DAT il numero di cicli effettivamente completati;
- aggiornare nell'istruzione LOOP del file EXEC.TXT il numero di cicli effettivamente completati.

Dopo aver trasferito tali files nella directory C:\MCA si è pronti per continuare l'elaborazione come al punto 9.2 con l'accortezza di tener conto dei tempi di interruzione in sede di elaborazione dati con EXCEL

- 9.2) L'alimentazione elettrica non è venuta a mancare. Selezionare l'opzione J "Verifica i files di spettro acquisiti" per accertarsi del fatto che non siano intervenute anomalie di funzionamento della scheda multicanale o della catena elettronica. Per ogni modalità di acquisizione verranno mostrati i dati identificativi della ROI utilizzata

---

**Elenco delle ROI contenute nel file SPOST.ROI**

---

ROI(1) dal canale 209 al canale 225  
ROI(2) dal canale 272 al canale 288

---

e l'andamento di tutti gli spettri acquisiti limitatamente alla parte interessata dalle ROI; saranno altresì riportati:

- i canali iniziali e finali che delimitano l'area di tracciamento degli spettri;
- il numero di canale corrente;
- il conteggio relativo al canale corrente;
- il nome dello spettro visualizzato;
- il nome del file ROI utilizzato;
- il valore dell'integrale dei conteggi limitatamente alla ROI visualizzata nella schermata;
- i canali di integrazione sullo spettro (ROI definita nel ROI file)

```
Canale iniziale : 204  
Canale finale   : 293  
  
Canale corrente      : 204  
Conteggio canale corrente : 113  
  
Nome spettro : 2CALIB.017  
Nome ROI file : SPOST.ROI  
  
Area totale visibile nella schermata : 50999  
Canali di integrazione : 209-225 272-288
```



Premendo il tasto ***Freccia a destra*** vengono mostrati i dati relativi al canale successivo; corrispondentemente il punto ad esso relativo cambia colore ed una linea verticale ne consente un'immediata individuazione.

Premendo il tasto ***Freccia a sinistra*** vengono mostrati i dati relativi al canale precedente; corrispondentemente il punto ad esso relativo cambia colore ed una linea verticale ne consente un'immediata individuazione.

Per posizionarsi rapidamente sul primo canale premere il tasto ***Home*** (freccia obliqua verso l'alto a sinistra).

Per posizionarsi rapidamente sull'ultimo canale premere il tasto ***FINE***.

Premere il tasto + per espandere orizzontalmente lo spettro: la schermata conterrà un minore numero di canali.

Premere il tasto - per comprimere orizzontalmente lo spettro: la schermata conterrà un maggiore numero di canali.

Premere il tasto ***Freccia in alto*** per espandere verticalmente lo spettro.

Premere il tasto ***Freccia in basso*** per comprimere verticalmente lo spettro.

Premere il tasto **Pag Up** per visualizzare un gruppo di canali più a destra : generalmente il canale finale della schermata corrente coinciderà con quello iniziale della schermata successiva.

Premere il tasto **Pag Down** per visualizzare un gruppo di canali più a sinistra : generalmente il canale iniziale della schermata corrente coinciderà con quello finale della schermata successiva.

Per tornare a visualizzare completamente lo spettro premere il tasto **R**.

Premere il tasto **ESC** per analizzare lo spettro successivo o per tornare al menù principale se è stato analizzato l'ultimo spettro.

10) Selezionare l'opzione D "Impostazione e gestione dati"; comparirà il menù di gestione per la scheda multicanale EG&G ORTEC (applicazione MG.EXE)

11) Selezionare l'opzione C "Elabora i reports"

11.1) Verranno elencati tutti i files acquisiti.

Elenco dei Data files	Elenco dei Data files
REPORTL.001	REPORTG.001
REPORTL.002	REPORTG.002
REPORTL.003	REPORTG.003
REPORTL.004	REPORTG.004
REPORTL.005	REPORTG.005
REPORTL.006	REPORTG.006
REPORTL.007	REPORTG.007
REPORTL.008	REPORTG.008

Alla richiesta di salvataggio di un file ARC riepilogativo rispondere affermativamente altrimenti l'elaborazione si interromperà. Se sono presenti su disco

files ARC relativi a precedenti elaborazioni dati, questi verranno elencati per consentire all'utente di scegliere un nome di file non usato (non sono consentite sovrascritture per evitare possibili perdite di dati importanti)



- 11.2) Immettere il nome senza estensione con cui salvare il file riepilogativo. Il software eseguirà un controllo per assicurarsi che il nome di file non sia già in uso

Si supponga che ogni ciclo consti di acquisizioni con Cella di Lucas ( $\alpha$ ) e con spettrometro  $\gamma$  con scintillatore a NaI(Tl) per analizzare il caso più complesso

- 11.3) Fornire l'efficienza di conteggio (CPM / Bq m<sup>-3</sup>) della Cella di Lucas ricavata con procedura di calibrazione<sup>2</sup>. Il dato verrà arrotondato alla 4<sup>a</sup> cifra decimale. Notare che se un valore di tale parametro è già stato fornito in una precedente esecuzione del software, verrà mostrato all'utente per modificarlo o meno
- 11.4) Fornire la  $\sigma$  dell'efficienza di conteggio (CPM / Bq m<sup>-3</sup>) della Cella di Lucas. Valgono le stesse considerazioni fatte al punto precedente
- 11.5) Va fornito il valore del fondo espresso in conteggi accumulati per un tempo pari a quello di acquisizione. Tale dato può essere letto da disco (a), ricavato automaticamente e memorizzato su disco (b) oppure immesso manualmente (c):
- a) ciò è possibile qualora per un determinato rivelatore, integrando su una medesima ROI per un identico tempo di conteggio, sia stato precedentemente acquisito il fondo tramite l'opzione B "Determinazione del fondo (scheda EG&G ORTEC)"



dell'applicazione CAE.EXE. In pratica si verifica l'esistenza nella directory corrente e la congruità del file FONDOX.DAT, dove il carattere X identificativo del rivelatore può valere L (Cella di Lucas), E (Camera Elettrostatica) o G (rivelatore con scintillatore a NaI(Tl))

- b) in questo caso non viene trovato alcun file contenente dati congruenti di fondo e viene richiesto se si deve crearne uno.

---

```
Salvo un file riepilogativo leggibile (S/N) ? S
Nome del file senza estensione : CICLO_01.ARC
```

---

```
Cella di Lucas. Efficienza di conteggio = 0.0370 ± 0.0019 CPM/Bq m-3
```

---

```
File FONDOL.DAT non trovato. Si vuole crearlo (S/N) ?
```

---

Rispondendo affermativamente compare un messaggio che comunica l'avvenuta interruzione nell'elaborazione dei reports. Selezionare l'opzione M "Esegui l'applicazione CAE.EXE", accertarsi che sia alimentata l'elettronica del rivelatore con cui acquisire il fondo e riprendere l'elaborazione dei reports secondo quanto descritto in precedenza

Rispondendo negativamente il valore del fondo deve essere inserito manualmente

- c) digitare il valore relativo ai conteggi di fondo, viene quindi proposto un valore per la  $\sigma_{\text{fondo}}$  dato da  $\sqrt{\text{fondo}}$ : si può accettarlo od immetterne uno differente nel caso si siano precedentemente ricavate informazioni statisticamente migliori

- 11.6) Viene tracciato in modalità grafica l'andamento in multiscaler dei dati acquisiti con la Cella di Lucas.

---

<sup>2</sup> CPM: Conteggi per minuto

```
Cella di Lucas. Numero totale misure - 12
Misura corrente n° 1
Valore misura corrente = 11997
Valore concentrazione - 17441 ± 651 Bq/ml
```

nello schermo in alto a sinistra sono riportati:

- il tipo di rivelatore usato ed il numero totale di misure effettuato;
- il numero di misura corrente;
- il conteggio relativo alla misura corrente;
- il valore di concentrazione relativo alla misura corrente.

Premendo il tasto **Freccia a destra** vengono mostrati i dati relativi alla misura successiva; corrispondentemente il punto ad essa relativo cambia colore ed una linea verticale ne consente un'immediata individuazione.

Premendo il tasto **Freccia a sinistra** vengono mostrati i dati relativi alla misura precedente; corrispondentemente il punto ad essa relativo cambia colore ed una linea verticale ne consente un'immediata individuazione.

Per posizionarsi rapidamente sulla prima misura premere il tasto **Home** (freccia obliqua verso l'alto a sinistra).

Per posizionarsi rapidamente sull'ultima misura premere il tasto **FINE**.

Premere il tasto **ESC** per proseguire nell'esecuzione del programma

#### 11.7) Rispondere alla richiesta di stampa in formato tabulare dei dati elaborati

```
Stampa i dati raccolti (S/N) ?
```

- 11.8) Vengono mostrati a video in formato tabulare i dati appena elaborati. Premere un tasto per continuare

N° misura	Conteggio netto	Concentrazione (in Bq/mc)
1	44997	17441
2	45685	17707
3	42568	16499
4	38656	14983
5	35624	13800
6	29552	11454
7	24488	9491
8	22189	8600
9	19892	7710
10	16204	6281
11	14395	5579
12	11709	4530

- 11.9) Vengono mostrate informazioni relative al ciclo di misure svolto come il tempo di conteggio, il tempo di attesa tra cicli successivi ed il tempo di attesa tra acquisizioni di uno stesso ciclo. Inoltre vengono ripresentati i dati relativi all'efficienza di conteggio della Cella di Lucas ed al conteggio di fondo ottenuto con essa.

```

Conteggio  $\alpha$  con Cella di Lucas e  $\gamma$  con NaI(Tl)

Tempo di conteggio = 3600 secondi
Tempo di attesa tra cicli successivi = 18000 secondi
Tempo di attesa tra acquisizioni di uno stesso ciclo = 3600 secondi

Cella di Lucas. Efficienza di conteggio = 0.0430  $\pm$  0.0016 CPM/(Bq/mc)

Conteggio di fondo = 689  $\pm$  26

```

Premere un tasto per continuare; si avvierà l'elaborazione dei dati acquisiti con l'altro rivelatore, nel nostro caso con uno spettrometro  $\gamma$  con scintillatore a NaI(Tl) da 3"×3"

- 11.10) Fornire il volume del Beaker Marinelli in cui è contenuto il campione d'acqua da analizzare. Notare che se un valore di tale parametro è già stato immesso in una precedente elaborazione dati ottenuti con spettrometro  $\gamma$ , verrà mostrato all'utente per modificarlo o meno.

- 11.11) Fornire l'efficienza di conteggio (CPM / Bq) del sistema di acquisizione  $\gamma$  ricavata con opportuna procedura di calibrazione. Valgono le stesse considerazioni fatte al punto 10.3
- 11.12) Fornire la  $\sigma$  dell'efficienza di conteggio (CPM / Bq) del sistema di acquisizione  $\gamma$ . Valgono le stesse considerazioni fatte al punto 11.3
- 11.13) Immettere il valore di fondo. Si veda il punto 11.5
- 11.14) Immettere la deviazione standard  $\sigma_{\text{fondo}}$  associata al valore del fondo. Si veda il punto 11.5

Volume del Beaker Marinelli - 0.698 l

Beaker Marinelli. Efficienza di conteggio 4.5283 ± 0.1833 CPM/Bq

Fondo letto in LUNDG.DAT : 18343 ± 135. Si accetta tale valore (S/N) ?

- 11.15) Viene tracciato in modalità grafica l'andamento in multiscaler dei dati acquisiti con lo spettrometro  $\gamma$ .

Beaker Marinelli. Numero totale misure - 12

Misura corrente n° 1

Valore misura corrente = 21077

Valore concentrazione - 112 ± 5 Bq/l

|

nello schermo in alto a sinistra sono riportati :

- il tipo di rivelatore usato ed il numero totale di misure effettuato ;
- il numero di misura corrente ;

- il conteggio relativo alla misura corrente;
- il valore di concentrazione relativo alla misura corrente;
- il valore del rapporto  $ROI_n/ROI_1$  ( $n = 2, 3 \dots NumMaxROI$ ) qualora il ROI file contenga almeno due regioni di integrazione

Premendo il tasto **Freccia a destra** vengono mostrati i dati relativi alla misura successiva; corrispondentemente il punto ad essa relativo cambia colore ed una linea verticale ne consente un'immediata individuazione.

Premendo il tasto **Freccia a sinistra** vengono mostrati i dati relativi alla misura precedente; corrispondentemente il punto ad essa relativo cambia colore ed una linea verticale ne consente un'immediata individuazione.

Per posizionarsi rapidamente sulla prima misura premere il tasto **Home** (freccia obliqua verso l'alto a sinistra).

Per posizionarsi rapidamente sull'ultima misura premere il tasto **FINE**.

Premere il tasto **ESC** per proseguire nell'esecuzione del programma

11.16) Rispondere alla richiesta di stampa in formato tabulare dei dati elaborati

11.17) Vengono mostrati a video in formato tabulare i dati appena elaborati. Premere un tasto per continuare

N° misura	Conteggio netto	Concentrazione (Bq/l)
1	21077	112
2	19609	105
3	17004	91
4	15024	84
5	14251	76
6	11657	62
7	9900	53
8	9077	48
9	7534	40
10	6943	37
11	5834	31
12	4399	23

11.18) Vengono ripresentati i dati relativi all'efficienza di conteggio del sistema  $\gamma$  ed al conteggio di fondo ottenuto con esso.

**Beaker Marinelli. Efficienza di conteggio = 4.5283 ± 0.1833 CPM/Bq**

**Conteggio di fondo = 18343 ± 135**

Premere un tasto per continuare

- 11.19) Per ogni coppia di acquisizioni  $\alpha$  e  $\gamma$  viene tracciato in modalità grafica il rapporto R tra i conteggi acquisiti con la Cella di Lucas e con il sistema  $\gamma$ .

$$R = \frac{\text{Conteggi}_{\text{Lucas}}}{\text{Conteggi}_{\text{BM}}}$$

valendo per la propagazione degli errori la relazione

$$\sigma_R = R \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\text{Lucas}}}{\text{Conteggi}_{\text{Lucas}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\text{BM}}}{\text{Conteggi}_{\text{BM}}}\right)^2}$$

Conteggio  $\alpha$  con Cella di Lucas e  $\gamma$  con NaI(Tl). Confronto dati

Misura corrente n° 5

Valore rapporto corrente = 2.46225



nello schermo in alto a sinistra sono riportati :

- il numero di ciclo corrente ;
- il valore del rapporto R per il ciclo corrente

Premendo il tasto **Freccia a destra** vengono mostrati i dati relativi al ciclo successivo; corrispondentemente il punto ad essa relativo cambia colore ed una linea verticale ne consente un'immediata individuazione.

Premendo il tasto **Freccia a sinistra** vengono mostrati i dati relativi al ciclo precedente; corrispondentemente il punto ad essa relativo cambia colore ed una linea verticale ne consente un'immediata individuazione.

Per posizionarsi rapidamente sulla prima misura premere il tasto **Home** (freccia obliqua verso l'alto a sinistra).

Per posizionarsi rapidamente sull'ultima misura premere il tasto **FINE**.

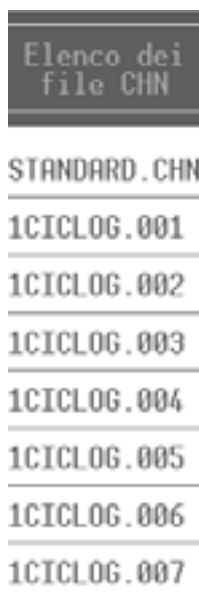
Una ragionevole costanza del valore di tale rapporto ci permette di verificare il corretto funzionamento dei due sistemi di acquisizione; qualora si riscontrassero anomalie si consiglia di analizzare gli spettri relativi alla coppia di misure corrispondenti.

Si tenga presente che ai valori di R relativi al periodo finale del ciclo di misure è associata una statistica ben peggiore, pertanto è normale osservare un certo discostamento dal valore medio.

Premere il tasto **ESC** per tornare al menù di gestione

12) Nel caso si voglia vedere o salvare in formato ASCII leggibile da EXCEL uno o più spettri acquisiti selezionare l'opzione D "Elabora i files di spettro"

12.1) Nella prima schermata è mostrato l'elenco dei files di spettro tra cui scegliere quello da elaborare



Tale elenco include anche i files di spettro creati con estensione CHN durante precedenti esecuzioni del software della ORTEC (nel caso specifico è stato incluso il file STANDARD.CHN relativo allo spettro ottenuto con una sorgente di calibrazione).

- 12.2) Rispondere secondo preferenze alla richiesta di salvataggio delle informazioni contenute nel file di spettro prescelto in un file riepilogativo scritto in formato ASCII leggibile dal programma EXCEL: ciò consentirà di costruire un grafico da inserire in documenti.

Rispondendo affermativamente viene mostrato l'elenco di files MCA riepilogativi già presenti sul disco in modo tale che l'utente possa scegliere un nome di file diverso da quelli già utilizzati.



Si chiede quindi di immettere il nome (max 8 caratteri) del file riepilogativo che verrà salvato con estensione MCA.



```
Nome del file CHN con estensione : STANDARD.CHN
Salvo un file MCA riepilogativo leggibile (S/N) ? S
Nome del File senza estensione : CAN_STD.MCA
Salvo il file CAN_STD.MCA (S/N) ?
```

### 12.3) Viene mostrato in modalità grafica l'andamento della serie di conteggi

```
Canale iniziale : 0
Canale finale   : 512

Canale corrente      : 40
Conteggio canale corrente : 629
```



nello schermo in alto a sinistra sono riportati

- il numero del canale iniziale dello spettro mostrato;
- il numero del canale finale dello spettro mostrato;
- il numero del canale corrente;
- il conteggio relativo al canale corrente

Premendo il tasto **Freccia a destra** vengono mostrati i dati relativi al canale successivo; corrispondentemente il punto ad esso relativo cambia colore ed una linea verticale ne consente un'immediata individuazione.

Premendo il tasto **Freccia a sinistra** vengono mostrati i dati relativi al canale precedente; corrispondentemente il punto ad esso relativo cambia colore ed una linea verticale ne consente un'immediata individuazione.

Per posizionarsi rapidamente sul primo canale premere il tasti **Home** (freccia obliqua verso l'alto a sinistra).

Per posizionarsi rapidamente sull'ultimo canale premere il tasto **Fine**.

Premere il tasto + per espandere orizzontalmente lo spettro: la schermata conterrà un minore numero di canali.

Premere il tasto - per comprimere orizzontalmente lo spettro: la schermata conterrà un maggiore numero di canali.

Premere il tasto **Freccia in alto** per espandere verticalmente lo spettro.

Premere il tasto **Freccia in basso** per comprimere verticalmente lo spettro.

Premere il tasto **Pag Up** per visualizzare un gruppo di canali più a destra : generalmente il canale finale della schermata corrente coinciderà con quello iniziale della schermata successiva.

Premere il tasto **Pag Down** per visualizzare un gruppo di canali più a sinistra : generalmente il canale iniziale della schermata corrente coinciderà con quello finale della schermata successiva.

Per tornare a visualizzare completamente lo spettro premere il tasto **R**.

Premere il tasto **B** per iniziare, a partire dal canale corrente, la selezione di un intervallo di canali su cui integrare. Il tasto è attivo solo se non è già in corso la definizione di un intervallo di canali o se non si sono già definiti 10 intervalli<sup>3</sup>.

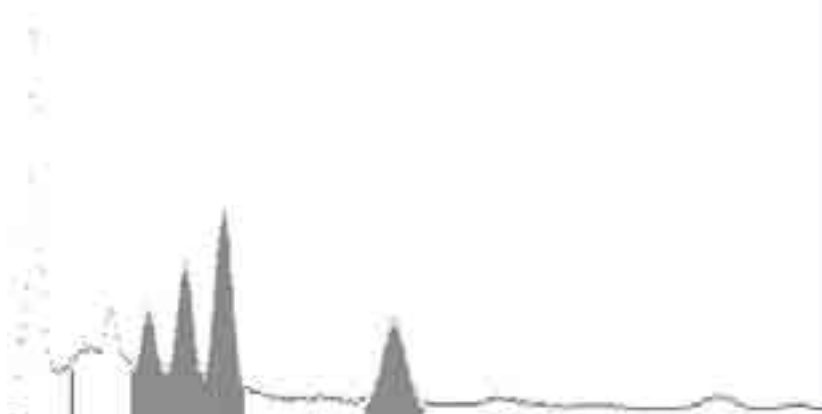
Premere il tasto **E** per terminare, con il canale corrente, la selezione di un intervallo di canali su cui integrare. Il tasto è attivo solo dopo che si è iniziata la selezione di un intervallo di canali.

Al termine della definizione di ogni intervallo di canali compaiono (o vengono aggiornati) a video il valore dell'integrale esteso ad ogni intervallo definito e gli intervalli stessi.

---

<sup>3</sup>Questo è un limite ritenuto ragionevole. Se tuttavia per particolari applicazioni non dovesse essere sufficiente si può facilmente ampliare

Canale iniziale : 0  
Canale finale : 512  
Canale corrente : 40  
Conteggio canale corrente : 629  
Area : 104197  
Canali di integrazione : 77-147 223-259



Per tornare al menù di gestione premere il tasto *ESC*

- 13) Selezionare l'opzione E "Cancella i reports" per cancellare i reports generati durante la fase di acquisizione<sup>4</sup>.
- 14) Selezionare l'opzione F "Cancella i files di spettro" per cancellare i files di spettro generati durante la fase di acquisizione. Si presti attenzione al fatto che verranno cancellati anche quei files di spettro aventi estensione CHN e stesso nome di quelli creati durante l'esecuzione del command file<sup>5</sup>.
- 15) Selezionare l'opzione N "Ritorno al DOS" per concludere l'elaborazione

<sup>4</sup> Qualora si vogliono conservare reports e spettri per successive rielaborazioni si consiglia di selezionare l'opzione M "Ritorno al DOS"; avviare l'applicazione CAE.EXE e selezionare l'opzione F "Converti i files acquisiti in un file compresso (scheda EG&G ORTEC)". Sarà pertanto superflua l'esecuzione delle opzioni E "Cancella i reports" e F "Cancella i files di spettro" del menù di gestione (si veda il capitolo IV)

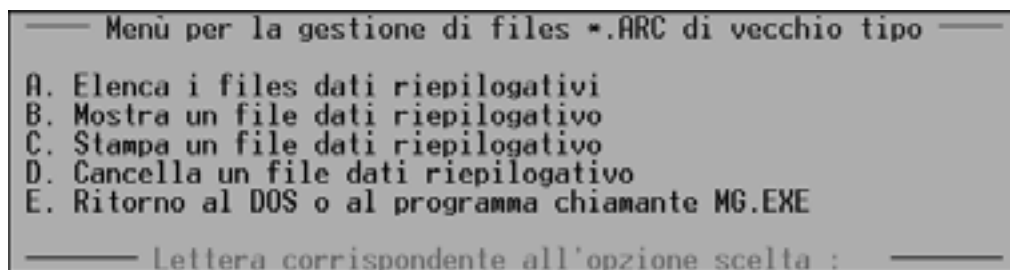
<sup>5</sup> Ciò può essere comunque evitato eseguendo nell'ordine le opzioni F e G dell'applicazione CAE.EXE (si veda il capitolo IV)

## CAPITOLO III

### Altre opzioni del menù di gestione per la scheda multicanale EG&G ORTEC (applicazione MG.EXE)

#### Opzioni

- G** Viene mostrato l'elenco dei files dati riepilogativi presenti nella directory corrente.
- H** Viene mostrato l'elenco dei files MCA riepilogativi delle informazioni di spettro presenti nella directory corrente. Per il loro utilizzo si rimanda al capitolo V
- I** Viene mostrato l'elenco dei files riepilogativi presenti nella directory corrente in modo da scegliere quello da ripresentare a video; successivamente, dopo averne immesso il nome, esso viene mostrato in forma grafica e tabellare. Si tenga presente che se il file prescelto è di vecchio tipo, per la sua gestione verrà richiamata l'applicazione OLDVIEW.EXE



In tal caso occorre ripetere la procedura di selezione del file

- J** Viene mostrato l'elenco dei files riepilogativi presenti nella directory corrente in modo da scegliere quello da stampare; successivamente, dopo averne immesso il nome, esso viene mostrato e contemporaneamente stampato in forma tabellare. Si tenga presente che se il file prescelto è di vecchio tipo, per la sua gestione verrà richiamata l'applicazione OLDVIEW.EXE. In tal caso occorre ripetere la procedura di selezione del file

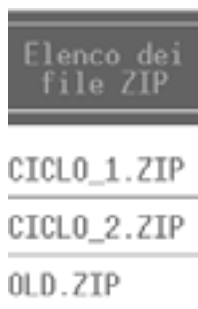
- K** Viene mostrato l'elenco dei files riepilogativi presenti nella directory corrente in modo da scegliere quello da cancellare; successivamente, dopo averne immesso il nome, esso viene cancellato.
- L** Viene mostrato l'elenco dei files MCA riepilogativi delle informazioni di spettro presenti nella directory corrente in modo da scegliere quello da cancellare; successivamente, dopo averne immesso il nome, esso viene cancellato.

## CAPITOLO IV

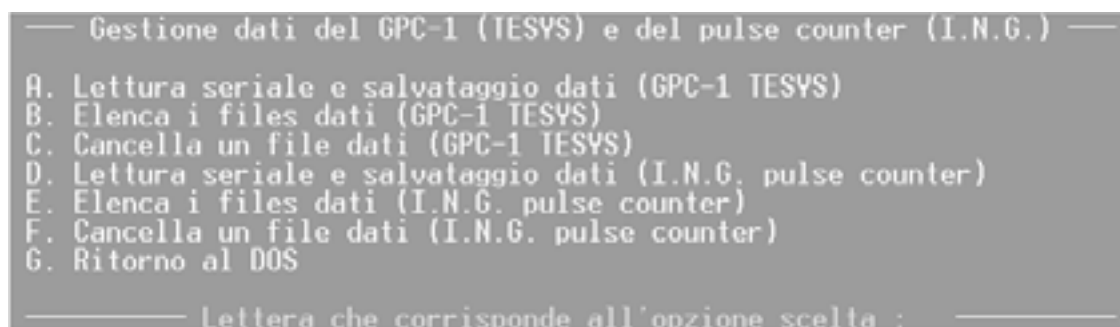
### **Altre opzioni dell'applicazione CAE.EXE di ausilio all'acquisizione e gestione dati con la scheda multicanale EG&G ORTEC**

#### **Opzioni**

- E** *Aggiorna il separatore decimale in un file ARC (scheda EG&G ORTEC).* Selezionare questa opzione per modificare il separatore decimale in un file ARC riepilogativo in accordo con le impostazioni memorizzate nel file CONFIG.DAT creato dall'applicazione SETUPMCS.EXE
- F** *Converti i files acquisiti in un file compresso (scheda EG&G ORTEC).* Selezionare questa opzione per convertire reports e spettri in un file compresso che conterrà anche il file di comando EXEC.TXT ed il file dati CLOCK.DAT. Ciò semplifica la procedura di copia su floppy disk nonché il trasferimento via e-mail dei dati acquisiti.
- Inoltre tale procedura è molto importante in quanto consente di risolvere incongruenze relative al numero di files di acquisizione su disco<sup>6</sup> o problemi connessi con il salvataggio di archivi con nome coincidente con quello di reports e spettri; quest'ultima evenienza è possibile esclusivamente a seguito di un uso improprio della directory di acquisizione ed elaborazione dati C:\MCA con altro software
- G** *Estrai i files acquisiti da un file compresso (scheda EG&G ORTEC).* Dopo aver copiato il file da decomprimere nella directory di acquisizione ed elaborazione dati C:\MCA selezionare questa opzione per ripristinare reports, spettri ed i files EXEC.TXT e CLOCK.DAT. Si potranno quindi elaborare i dati acquisiti secondo la procedura descritta nel capitolo II.
- H** *Elenca i files compressi (scheda EG&G ORTEC).* Selezionare questa opzione per elencare a video tutti gli archivi compressi presenti nella directory C:\MCA



- I** Cancella un file compresso (scheda EG&G ORTEC). Selezionare questa opzione per cancellare uno degli archivi compressi elencati a video
- K** Gestione delle comunicazioni seriali. Selezionando questa opzione verrà mostrato un menù di gestione per comunicare serialmente con il *General Purpose Counter MOD. GPC 1* della TESYS o con il *Pulse Counter* messo a punto dall'Ing. Romeo dell'Istituto Nazionale di Geofisica



**Opzione A.** Lettura seriale e salvataggio dati (GPC-1 TESYS)

Dopo aver predisposto il GPC-1 alla trasmissione dei dati (step 14 della procedura descritta nell'Appendice A)

- digitare il numero della porta seriale del PC a cui è collegato il GPC 1;
- immettere il nome del file<sup>7</sup> in cui scaricare i dati acquisiti, tale file avrà estensione GPC e sarà leggibile da EXCEL. Rispondendo affermativamente alla richiesta di conferma del nome del file scelto il PC mostrerà un messaggio di aiuto e, dopo che

<sup>6</sup> Come ad esempio in caso di cancellazione accidentale di uno o più reports o spettri

<sup>7</sup> Si ricorda che anche in questo caso non sarà consentito scegliere un nome di file già in uso

l'utente avrà premuto un tasto, si porrà in modalità di attesa trasmissione dati dal GPC-1;

```

Porta seriale numero : 1
Nome del file GPC (max 8 caratteri) : TESYS
Premere un tasto ed avviare la trasmissione seriale dal GPC-1

```

- tornare ad operare con il General Purpose Counter Mod. GPC-1. Per avviare la trasmissione dati occorre premere ripetutamente il pulsante NEXT finché non si seleziona la voce *Output*, quindi premere il pulsante ENTER. I dati compariranno a video formattati come nella figura che segue

```

Dati trasmessi
"05-01-99", "10:53", "00:02:00", " 030", "Counts = 18235.00 ", ""
"05-01-99", "10:55", "00:02:00", " 031", "Counts = 18514.00 ", ""
"05-01-99", "10:57", "00:02:00", " 032", "Counts = 18490.00 ", ""
"05-01-99", "10:59", "00:02:00", " 033", "Counts = 18666.00 ", ""
"05-01-99", "11:01", "00:02:00", " 034", "Counts = 18547.00 ", ""
"05-01-99", "11:03", "00:02:00", " 035", "Counts = 18547.00 ", ""
"05-01-99", "11:05", "00:02:00", " 036", "Counts = 18712.00 ", ""
"05-01-99", "11:07", "00:02:00", " 037", "Counts = 18849.00 ", ""
"05-01-99", "11:09", "00:02:00", " 038", "Counts = 18452.00 ", ""
"05-01-99", "11:11", "00:02:00", " 039", "Counts = 18684.00 ", ""
"05-01-99", "11:13", "00:02:00", " 040", "Counts = 18478.00 ", ""
"05-01-99", "11:15", "00:02:00", " 041", "Counts = 18457.00 ", ""
"05-01-99", "11:17", "00:02:00", " 042", "Counts = 18573.00 ", ""
"05-01-99", "11:19", "00:02:00", " 043", "Counts = 18646.00 ", ""
"05-01-99", "11:21", "00:02:00", " 044", "Counts = 18727.00 ", ""
"05-01-99", "11:23", "00:02:00", " 045", "Counts = 18506.00 ", ""

Terminata la trasmissione seriale dal GPC-1 premere ^C (Ctrl-C)

```

- digitare la combinazione di tasti ^C (Ctrl-C) dalla tastiera del PC. L'elaborazione continuerà presentando i dati in una forma più simile a quella in cui sono memorizzati nel file GPC



N° misura	Data e Ora misura	Tempo di acquisizione	Conteggio lordo
1	05/01/99 10.53	00:02:00	18235
2	05/01/99 10.55	00:02:00	18514
3	05/01/99 10.57	00:02:00	18490
4	05/01/99 10.59	00:02:00	18666
5	05/01/99 11.01	00:02:00	18547
6	05/01/99 11.03	00:02:00	18547
7	05/01/99 11.05	00:02:00	18712
8	05/01/99 11.07	00:02:00	18849
9	05/01/99 11.09	00:02:00	18452
10	05/01/99 11.11	00:02:00	18681
11	05/01/99 11.13	00:02:00	18478
12	05/01/99 11.15	00:02:00	18457
13	05/01/99 11.17	00:02:00	18573
14	05/01/99 11.19	00:02:00	18646
15	05/01/99 11.21	00:02:00	18727
16	05/01/99 11.23	00:02:00	18506

- premere un tasto per concludere l'esecuzione dell'opzione A. È buona norma a questo punto tornare ad operare con il GPC-1 per cancellare il contenuto della memoria; per fare questo premere ripetutamente il pulsante NEXT finché non si seleziona la voce *Erase*, quindi premere in successione i pulsanti ENTER, INCR ed ENTER.

**Opzione B. Elenca i files dati (GPC-1 TESIS)**

Viene mostrato l'elenco dei files dati GPC presenti nella directory corrente

**Opzione C. Cancella un file dati (GPC-1 TESIS)**

Viene mostrato l'elenco dei files dati GPC presenti nella directory corrente tra cui scegliere quello da cancellare

**Opzione D. Lettura seriale e salvataggio dati (I.N.G. Pulse Counter)**

Versione definitiva del Pulse Counter I.N.G. non ancora disponibile

**Opzione E. Elenca i files dati (I.N.G. Pulse Counter)**

Versione definitiva del Pulse Counter I.N.G. non ancora disponibile

**Opzione F. Cancella un file dati (I.N.G. Pulse Counter)**

Versione definitiva del Pulse Counter I.N.G. non ancora disponibile

**Opzione G. Ritorno al DOS**

Conclude l'esecuzione dell'applicazione SER\_COMM.EXE e fa tornare al prompt del DOS

**L** Imposta il separatore decimale. Selezionando questa opzione si richiama l'applicazione SETUPMCS.EXE che permette di impostare il separatore decimale da usare (si veda il capitolo I al punto 2)

**M** Reboot del sistema. Selezionando questa opzione si riavvia il computer (esegue il comando CTRL-ALT-CANC)

## CAPITOLO V

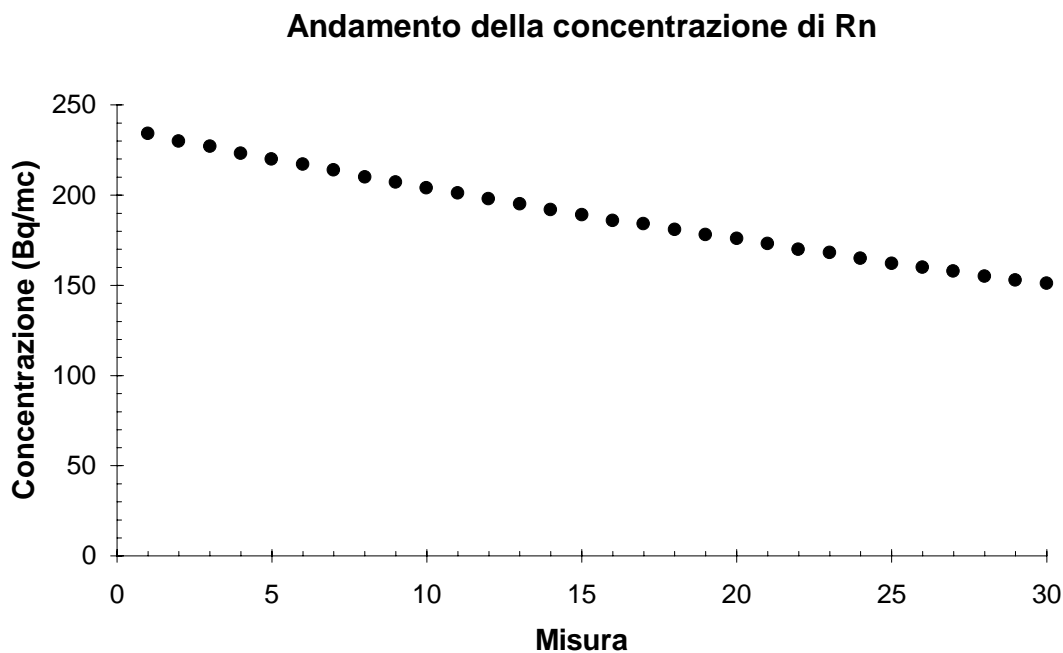
### Conversione in grafico EXCEL di un file riepilogativo di un ciclo di misure

Il formato testo è leggibile da EXCEL. I conteggi ottenuti nelle singole misure e i relativi valori di concentrazione saranno posti rispettivamente nella seconda e quarta colonna del foglio di lavoro (nella terza e quinta sono contenute le loro deviazioni standard). Nelle prime righe saranno riportati il tipo di rivelatore usato, il tempo di conteggio ed eventualmente i tempi di attesa tra cicli successivi e di pausa tra acquisizioni di uno stesso ciclo, il numero di ROI, l'efficienza di conteggio, il valore del conteggio di fondo e sua deviazione standard. Esaminiamo ora in dettaglio la procedura da seguire una volta entrati in EXCEL per costruire un grafico relativo all'andamento dei valori di concentrazione :

1. Dal menù *File* selezionare *Apri*, posizionarsi nella directory contenente il file riepilogativo che si desidera graficare, scegliere il filtro *Tutti i file (\*.\*)* e caricare il file ARC prescelto
2. Nella finestra *Autocomposizione importa testo - Passaggio 1 di 3* premere il bottone *Successivo*
3. Nella finestra *Autocomposizione importa testo - Passaggio 2 di 3* premere il bottone *Successivo*
4. Nella finestra *Autocomposizione importa testo - Passaggio 3 di 3* premere il bottone *Termina*. Verrà mostrato il contenuto del file
5. Selezionare tutte le celle della prima e quarta colonna contenenti i numeri delle misure e relativi valori di concentrazione
6. Premere il bottone *Crea (grafico)*
7. Tracciare un riquadro destinato a ospitare il grafico
8. Premere il bottone *Successivo* del pop up che compare
9. Selezionare l'icona corrispondente ai grafici a dispersione e premere il bottone *Successivo*
10. Selezionare l'icona numero 1 o 3 e premere il bottone *Successivo*
11. Premere il bottone *Successivo*

12. Dare un titolo al grafico e nomi agli assi; decidere se si vuole una legenda
13. Premere il bottone *Termina*
14. Fare un doppio clic sul grafico per aprirlo
15. Cliccare sull'asse delle ordinate per selezionarlo. Fare un doppio clic per aprire la finestra *Formato asse - Motivi*
16. Cliccare sul page control *Scala*
17. Inserire un opportuno valore minimo per comprimere il grafico
18. Premere il bottone *OK*

Ora il grafico è stato creato; esso può essere salvato in un file XLC di EXCEL, stampato e/o incluso in un documento Word. Di seguito è riportato un tipico output prodotto seguendo la procedura appena descritta.

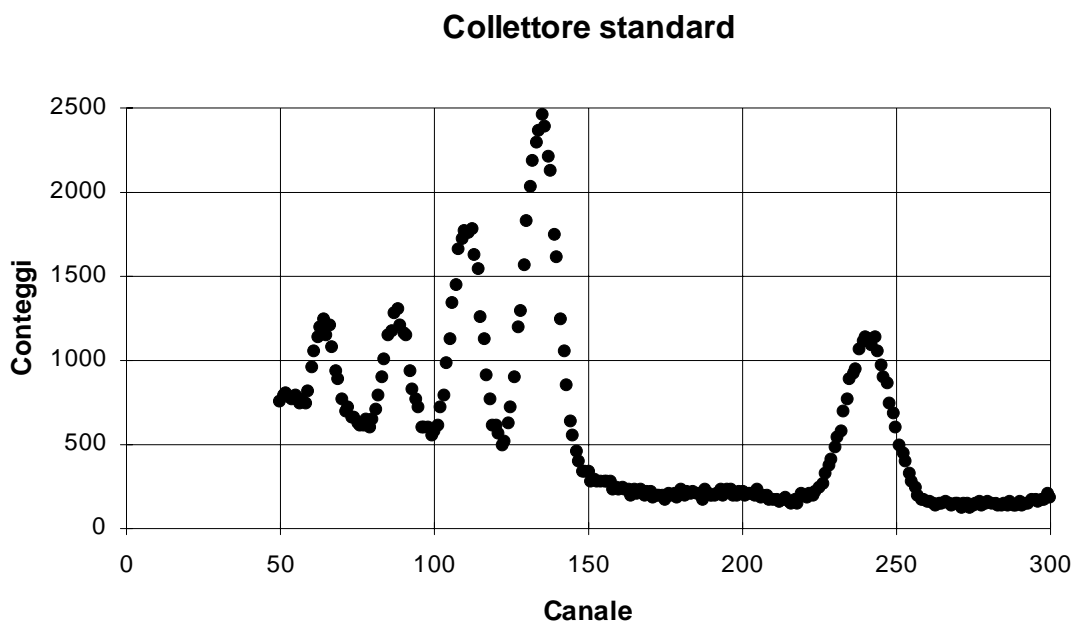


## Conversione in grafico EXCEL di un file MCA riepilogativo di spettro

Il formato testo è leggibile da EXCEL. Tutti i numeri relativi ai canali e ai rispettivi conteggi verranno posti in due colonne distinte del foglio di lavoro. Esaminiamo ora in dettaglio la procedura da seguire una volta entrati in EXCEL :

1. Dal menù *File* selezionare *Apri*, posizionarsi nella directory contenente il file riepilogativo che si desidera graficare, scegliere il filtro *Tutti i file (\*.\*)* e caricare il file con estensione MCA prescelto
2. Nella finestra *Autocomposizione importa testo - Passaggio 1 di 3* premere il bottone *Successivo*
3. Nella finestra *Autocomposizione importa testo - Passaggio 2 di 3* premere il bottone *Successivo*
4. Nella finestra *Autocomposizione importa testo - Passaggio 3 di 3* premere il bottone *Termina*. Verrà mostrato il contenuto del file
5. Selezionare tutte quelle celle della prima e seconda colonna in relazione al range di canali con cui costruire il grafico desiderato. Si ricordi di non selezionare più di 4000 canali altrimenti si supereranno le capacità di aggregazione dati di EXCEL
6. Premere il bottone *Crea (grafico)*
7. Tracciare un riquadro destinato a ospitare il grafico
8. Premere il bottone *Successivo* del pop up che compare
9. Selezionare l'icona corrispondente ai grafici a dispersione e premere il bottone *Successivo*
10. Selezionare l'icona numero 3 e premere il bottone *Successivo*
11. Premere il bottone *Successivo*
12. Dare un titolo al grafico e nomi agli assi; decidere se si vuole una legenda
13. Premere il bottone *Termina*

Ora il grafico è stato creato; esso può essere salvato in un file XLC di EXCEL, stampato e/o incluso in un documento Word. Segue un grafico ottenuto seguendo la procedura appena illustrata.



**Nota Bene :** Lo step 5 può essere particolarmente laborioso qualora si voglia selezionare un numero elevato di canali e non si disponga di una scheda grafica accelerata per Windows, pertanto si consiglia il seguente metodo di selezione :

- Selezionare un numero ristretto di canali
- Premere il bottone *Crea (grafico)*
- Tracciare un riquadro destinato a ospitare il grafico
- Modificare manualmente l'intervallo selezionato in modo da comprendere tutti i canali desiderati. Ad esempio, se le celle di interesse sono quelle delimitate dalle colonne A e B e dalle righe da 1 a 3000, digitare **=A\$1:B\$3000**

si riprende poi dallo step 8.

## MESSAGGI DI ERRORE

Quando si verifica un errore nell'esecuzione di uno dei moduli eseguibili si possono presentare due possibilità: si tratta di un errore che è previsto possa verificarsi in determinate condizioni limite oppure di un errore imprevisto. Appartengono a quest'ultima classe anche i cosiddetti "errori interni" nei moduli, a cui non è possibile porre rimedio; viene in ogni caso comunicato all'utente il codice dell'errore che si è verificato: ciò assume importanza quando si voglia ovviare semplicemente ad una situazione imprevista dal programmatore. Per quanto riguarda invece la prima classe di errori, seguono i messaggi che possono venire mostrati all'utente insieme alle possibili cause che li possono generare.

### **Attenzione. Impossibile continuare senza salvare alcun dato delle acquisizioni.**

- Messaggio che compare durante l'esecuzione dell'applicazione EDITOR.EXE se non si vogliono salvare reports né spettri.

### **Calibrazione già eseguita o incongruenze tali da richiedere nuovamente la creazione del file di comando EXEC.TXT**

- Messaggio che può comparire durante l'esecuzione dell'applicazione CALIBRA.EXE nel caso la calibrazione sia già stata eseguita o il file *CALIB-16.DAT* contenga informazioni inconsistenti.

### **È stata completata soltanto una serie di misure delle \*\*\* previste.**

- Messaggio che compare durante l'esecuzione dell'applicazione CAE.EXE (opzione F) se è stato portato a termine soltanto un ciclo completo di misure degli \*\*\* previsti.

### **Files ARC non trovati nella directory corrente.**

- Files riepilogativi non sono stati ancora creati dal modulo MAKEPLOT.EXE, pertanto non si può elencarli, stamparli, cancellarli o mostrarne il contenuto.
- Tutti i files riepilogativi creati dal modulo MAKEPLOT.EXE sono già stati cancellati, pertanto non si può elencarli, stamparli, cancellarli o mostrarne il contenuto.

**File ATTESA.EXE non trovato.**

- Messaggio visualizzato durante l'esecuzione del modulo EDITOR.EXE. Si è nell'impossibilità di salvare un file di comando in grado di essere eseguito correttamente in quanto non è presente nella directory corrente il modulo ATTESA.EXE che permette di introdurre il richiesto tempo di attesa tra un'acquisizione dati e la successiva. Occorre ripetere l'installazione del software.

**File BOOTWARN.INF non valido. Proseguire manualmente.**

- Questo messaggio compare all'avvio delle applicazioni CAE.EXE, MAKEPLOT.EXE, MG.EXE e SER\_COMM.EXE se viene trovato un file *BOOTWARN.INF* non valido. La presenza di questo file indica che l'alimentazione elettrica è venuta a mancare almeno una volta durante l'esecuzione del ciclo di misure, pertanto occorrerà ripristinare manualmente i dati (si veda il capitolo II al punto 9.1); le durate delle interruzioni andranno desunte dal giorno e ora dei files acquisiti.

**File CAE.EXE non trovato**

- Questo messaggio può comparire durante l'esecuzione dell'applicazione MG.EXE se il file CAE.EXE non viene trovato.

**File CALIB-16.DAT non trovato. Creare il file di comando EXEC.TXT**

- Questo messaggio può comparire durante l'esecuzione dell'applicazione CALIBRA.EXE se il file contenente i parametri di calibrazione temporale non viene trovato. Il file *CALIB-16.DAT* è creato o modificato durante la creazione del file di comando.

**File CALIBRA.EXE non trovato. Impossibile calibrare.**

- Questo messaggio compare all'esecuzione dell'opzione A dell'applicazione CAE.EXE se il file CALIBRA.EXE non viene trovato. In tal caso non sarà possibile apportare correzioni ai parametri temporali di ciclo. Occorre ripetere l'installazione del software.



**File CHECKCHN.EXE non trovato. Impossibile verificare gli spettri**

- Questo messaggio compare all'esecuzione dell'opzione J dell'applicazione CAE.EXE se il file CHECKCHN.EXE non viene trovato. In tal caso non sarà possibile verificare il contenuto dei files di spettro. Occorre ripetere l'installazione del software.

**File CLOCK.DAT in versione non aggiornata. Creare il file di comando EXEC.TXT**

- Questo messaggio compare durante l'esecuzione dell'applicazione CALIBRA.EXE se il file *CLOCK.DAT* non contiene il dato relativo al tempo di conteggio.

**File CLOCK.DAT in versione non aggiornata. Impossibile continuare**

- Questo messaggio compare durante l'esecuzione dell'applicazione FONDO.EXE se il file *CLOCK.DAT* non contiene il dato relativo al tempo di conteggio.

**File CLOCK.DAT non trovato.**

- Questo messaggio di errore può comparire fintanto che non viene creato per la prima volta il file di comando *EXEC.TXT*, ossia fintanto che non viene eseguita per la prima volta l'opzione A dell'applicazione MG.EXE
- Questo messaggio di errore può essere generato dall'applicazione CHECKCHN.EXE; non si può risalire al nome assegnato dall'utente ai files di spettro per verificarne il contenuto. L'esecuzione sarà interrotta.
- Questo messaggio di errore può essere generato dall'applicazione PAUSA.EXE; non sarà possibile sospendere per il tempo desiderato l'esecuzione del ciclo di misure tra acquisizioni di uno stesso ciclo. L'esecuzione sarà interrotta.
- Questo messaggio di errore può essere generato dall'applicazione PLOTCHN.EXE; non sarà possibile leggere le informazioni di ciclo, pertanto l'esecuzione sarà interrotta.
- Questo messaggio di errore può essere generato dall'applicazione SETSTART.EXE; non sarà possibile avviare il ciclo di misure.

**File CLOCK.DAT non trovato. Impossibile continuare**

- Questo messaggio può comparire fintanto che non sia stato creato il primo file di comando *EXEC.TXT* oppure a seguito della cancellazione del file *CLOCK.DAT* e protegge dall'esecuzione accidentale dell'applicazione BOOTMCA.EXE.

- Messaggio che può comparire durante l'esecuzione dell'applicazione CAE.EXE (opzione F) quando in assenza delle informazioni di ciclo non è possibile procedere alla compressione dei files acquisiti.
- Messaggio che può comparire durante l'esecuzione dell'applicazione CALIBRA.EXE quando in assenza delle informazioni di ciclo non è possibile procedere con la calibrazione del sistema.

**File CLOCK.DAT non valido. Impossibile continuare**

- Questo messaggio può essere generato dalle applicazioni BOOTMCA.EXE, CAE.EXE, CALIBRA.EXE, FONDO.EXE, MAKEPLOT.EXE, MG.EXE, PLOTCHN.EXE e SERTESYS.EXE nel caso in cui sia danneggiato il file *CLOCK.DAT* contenente informazioni di ciclo.

**File CLOCK.DAT non valido o file CALIB-16.DAT mancante. Impossibile continuare**

- Questo messaggio compare durante l'esecuzione delle applicazioni BOOTMCA.EXE, CAE.EXE, CHECKCHN.EXE, MAKEPLOT.EXE, MG.EXE, PLOTCHN.EXE e SERTESYS.EXE nel caso in cui manchi il file *CALIB-16.DAT* o sia danneggiato il file *CLOCK.DAT* contenenti rispettivamente informazioni di calibrazione temporale e di ciclo.

**File CONFIG.DAT non valido. Verrà cancellato.**

- Messaggio di errore generato dalle applicazioni CAE.EXE e MAKEPLOT.EXE. Il file *CONFIG.DAT* contiene informazioni relative al separatore decimale non valide, pertanto sarà cancellato e ricreato.

**File di comando EXEC.CMD non trovato. Impossibile avviare il ciclo di misure.**

- Questo messaggio di errore è generato dall'applicazione CAE.EXE (opzione C) e può comparire fintanto che non viene creato e compilato per la prima volta il file di comando *EXEC.TXT*.

**Files di spettro *Nomefile.\** non trovati. Impossibile cancellare.**

- Messaggio mostrato dal modulo MG.EXE. Si è tentato di cancellare i files di spettro ancor prima che il software della ORTEC li abbia creati.
- Messaggio mostrato dal modulo MG.EXE. Si è cercato di cancellare i files di spettro dopo averli già cancellati tutti.

**File EDITOR.EXE non trovato.**

- Messaggio visualizzato durante l'esecuzione del modulo MG.EXE. Si è nell'impossibilità di creare un file di comando in quanto il modulo EDITOR.EXE non è presente nella directory corrente. Occorre ripetere l'installazione del software.

**File EXEC.TXT incompatibile con CLOCK.DAT. Impossibile continuare**

- Questo messaggio di errore è generato dall'applicazione CHECKCHN.EXE; le informazioni contenute nei due files dati sono incompatibili e l'esecuzione sarà interrotta.

**File EXEC.TXT non trovato.**

- Questo messaggio di errore può essere generato dall'applicazione CHECKCHN.EXE; non si può risalire al nome del file ROI impiegato durante il ciclo di misure e l'esecuzione sarà interrotta.
- Questo messaggio di errore può essere generato dall'applicazione SETSTART.EXE; non sarà possibile avviare il ciclo di misure.

**File EXEC.TXT non trovato. Impossibile continuare.**

- Questo messaggio di errore può comparire fintanto che non viene creato per la prima volta il file di comando *EXEC.TXT* oppure a seguito della sua rimozione e protegge dall'esecuzione accidentale dell'applicazione BOOTMCA.EXE.
- Messaggio che può comparire durante l'esecuzione dell'applicazione CAE.EXE (opzione F) quando in assenza del file di comando non è possibile procedere alla compressione dei files acquisiti.

- Messaggio che può comparire durante l'esecuzione dell'applicazione CALIBRA.EXE quando in assenza del file di comando non è possibile procedere con la calibrazione del sistema.

**File EXEC.TXT non valido. Impossibile continuare.**

- Questo messaggio di errore viene generato dalle applicazioni MAKEPLOT.EXE e FONDO.EXE qualora si riscontrino incongruenze nel file *EXEC.TXT*

**File *FileDiFondo.DAT* non trovato. Impossibile continuare.**

- Messaggio di errore generato dall'applicazione FONDO.EXE quando si verifica un'anomalia nel salvataggio del file *FileDiFondo.DAT*

**File FONDO.EXE non trovato. Impossibile determinare il fondo.**

- Questo messaggio di errore può comparire durante l'esecuzione dell'applicazione CAE.EXE (opzione B) se non viene trovato il file FONDO.EXE; in tal caso occorre ripetere l'installazione del software.

**File FONDOINF.DAT non trovato. Impossibile continuare.**

- Questo messaggio di errore può comparire all'apertura dell'applicazione FONDO.EXE se il file che dovrebbe contenere il nome del file in cui memorizzare i dati di fondo non è trovato.

**File FONDOINF.DAT non valido. Impossibile continuare.**

- Questo messaggio di errore può comparire durante l'esecuzione dell'applicazione FONDO.EXE se il file che dovrebbe contenere il nome del file in cui memorizzare i dati di fondo non è valido.

**File già esistente.**

- Si è immesso il nome di un file riepilogativo (ARC) da salvare già presente nella directory corrente. È questa una misura cautelativa che può evitare il pericoloso cancellamento di dati significativi precedentemente archiviati dall'utente.

- Si è immesso il nome di un file MCA riepilogativo di spettro da salvare già presente nella directory corrente. È questa una misura cautelativa che può evitare il pericoloso cancellamento di dati significativi precedentemente archiviati dall'utente.

**Files GPC (TESYS) non trovati nella directory corrente.**

- Messaggio mostrato dall'applicazione SER\_COMM.EXE (opzioni B e C) quando si tenta di mostrare o cancellare files dati non presenti nella directory di acquisizione.

**File INFOWAIT.DAT non trovato.**

- Messaggio visualizzato durante l'esecuzione del modulo ATTESA.EXE. Si è nell'impossibilità di leggere il file che contiene le informazioni temporali relative al ciclo di misure. È mostrato generalmente a seguito di un'esecuzione accidentale dell'applicazione ATTESA.EXE quando il ciclo di misure è già terminato.
- Questo messaggio di errore può essere generato dall'applicazione PAUSA.EXE; non sarà possibile interrompere l'esecuzione del ciclo di misure tra acquisizioni di uno stesso ciclo. L'esecuzione sarà interrotta.
- Questo messaggio di errore può essere generato dall'applicazione SETSTART.EXE; non sarà possibile avviare il ciclo di misure.

**File INFOWAIT.DAT non trovato. Impossibile continuare**

- Questo messaggio compare fintanto che non sia stato creato il primo file di comando *EXEC.TXT* oppure a seguito della cancellazione del file *INFOWAIT.DAT* e protegge dall'esecuzione accidentale dell'applicazione BOOTMCA.EXE.
- Messaggio che può comparire durante l'esecuzione dell'applicazione CALIBRA.EXE quando si tenta di calibrare il sistema prima di aver creato il file di comando.

**Files ING non trovati nella directory corrente.**

- Messaggio che compare durante l'esecuzione dell'applicazione SER\_COMM.EXE (opzioni E, F) se non è stato trovato alcun file \*.ING da mostrare o cancellare

**File MAKEPLOT.EXE non trovato.**

- Messaggio visualizzato durante l'esecuzione del modulo MG.EXE. Si è nell'impossibilità di elaborare i reports creati dal software della ORTEC in quanto il modulo MAKEPLOT.EXE non è presente nella directory corrente. Occorre ripetere l'installazione del software.

**Files MCA non trovati nella directory corrente.**

- Messaggio mostrato dal modulo MG.EXE. Files MCA riepilogativi di spettro non sono stati ancora creati dal modulo PLOTCHN.EXE, pertanto non si può elencarli o cancellarli.
- Messaggio mostrato dal modulo MG.EXE. Tutti i files MCA riepilogativi di spettro creati dal modulo PLOTCHN.EXE sono già stati cancellati, pertanto non si può elencarli o cancellarli.

**File MCA.EXE non trovato. Impossibile avviare il ciclo di misure.**

- Questo messaggio di errore compare durante l'esecuzione dell'applicazione CAE.EXE (opzione C) se non viene trovato il file MCA.EXE; in tal caso occorre ripetere l'installazione del software MAESTRO II della EG&G ORTEC.

**File MCA.EXE non trovato. Impossibile calibrare.**

- Messaggio di errore generato dall'applicazione CALIBRA.EXE se non viene trovato il file MCA.EXE; in tal caso occorre ripetere l'installazione del software MAESTRO II della EG&G ORTEC.

**File MCA.EXE non trovato. Impossibile creare FONDO.DAT**

- Messaggio di errore generato dall'applicazione FONDO.EXE se non viene trovato il file MCA.EXE necessario per l'acquisizione dati; in tal caso occorre ripetere l'installazione del software MAESTRO II della EG&G ORTEC.

**File MG.EXE non trovato. Impossibile impostare o analizzare i dati.**

- Questo messaggio di errore può comparire durante l'esecuzione dell'applicazione CAE.EXE (opzione D) se non viene trovato il file MG.EXE; in tal caso occorre ripetere l'installazione del software.

**File *Nomefile.ARC* non valido. Verrà cancellato.**

- Durante l'esecuzione delle applicazioni OLDVIEW.EXE o MG.EXE si è tentato di mostrare o di stampare un file riepilogativo non valido in quanto vuoto. Questa particolare circostanza può verificarsi a causa di una temporanea mancanza di alimentazione elettrica o in seguito alla richiesta dell'utente di interrompere bruscamente l'esecuzione del programma (*Ctrl-C* o *Ctrl-Break*).

**File *Nomefile.Ext* già esistente. Impossibile continuare.**

- Questo messaggio è generato dall'applicazione CAE.EXE quando si è nell'impossibilità di spostare un file avente lo stesso nome (*Nomefile*) di reports o spettri dalla directory di elaborazione alla subdirectory \BACK in quanto tale file (*Nomefile.Ext*) è già in uso nella directory destinazione.

**File *Nomefile.ROI* non trovato.**

- Durante l'esecuzione dell'applicazione CHECKCHN.EXE non è stato trovato il ROI file utilizzato per la creazione dei reports. Non sarà possibile verificare gli spettri acquisiti.

**File non esistente su disco.**

- Si è immesso il nome di un file dati riepilogativo (ARC) da mostrare, stampare, cancellare o aggiornare non presente nella directory di acquisizione.
- Si è immesso il nome di un file MCA riepilogativo di spettro da cancellare non presente nella directory corrente.
- Si è immesso un nome di file \*.GPC o \*.ING riepilogativo di un'acquisizione seriale da mostrare o cancellare non presente nella directory di acquisizione.
- Si è immesso il nome di un file ZIP da decomprimere non presente nella directory corrente.

- Durante l'esecuzione del modulo PLOTCHN.EXE si è immesso il nome di un file di spettro da elaborare non presente nella directory corrente.

**File NULLA.ROI non trovato.**

- Messaggio visualizzato durante l'esecuzione del modulo EDITOR.EXE. Si è nell'impossibilità di salvare un file di comando in grado di essere eseguito correttamente in quanto non è presente nella directory corrente il file *NULLA.ROI* che permette di annullare la selezione dei canali su cui integrare al termine dell'acquisizione dati.

**File OLDVIEW.EXE non trovato.**

- Messaggio visualizzato durante l'esecuzione del modulo MG.EXE (opzioni I e J). Si è nell'impossibilità di mostrare o stampare un file dati riepilogativo di vecchio tipo in quanto l'applicazione OLDVIEW.EXE non è presente nella directory corrente. Occorre installare nuovamente il software.

**File PARSE.EXE non trovato. Impossibile compilare.**

- Messaggio visualizzato durante l'esecuzione del modulo MG.EXE. Si è nell'impossibilità di compilare il file di comando in quanto il modulo PARSE.EXE non è presente nella directory corrente. Occorre installare di nuovo il software MAESTRO II della EG&G ORTEC.
- Messaggio visualizzato durante l'esecuzione del modulo CALIBRA.EXE. Si è nell'impossibilità di compilare il file di comando per eseguire la calibrazione temporale del sistema in quanto il modulo PARSE.EXE non è presente nella directory corrente. Occorre installare di nuovo il software MAESTRO II della EG&G ORTEC.
- Tale messaggio può essere visualizzato durante l'esecuzione del modulo FONDO.EXE. Si è nell'impossibilità di compilare il file di comando per eseguire l'acquisizione del fondo con i parametri temporali del ciclo di misure di cui si è appena interrotta l'elaborazione. Occorre installare di nuovo il software MAESTRO II della EG&G ORTEC.



**File PARSE.EXE non trovato. Impossibile continuare.**

- Messaggio visualizzato durante l'esecuzione del modulo BOOTMCA.EXE. Non potrà essere compilato il file di comando modificato al riavvio del computer, pertanto si è nell'impossibilità di riprendere i cicli di misure. Occorre installare di nuovo il software MAESTRO II della EG&G ORTEC.

**File PAUSA.EXE non trovato.**

- Messaggio visualizzato durante la creazione del file di comando (applicazione EDITOR.EXE) quando si desidera introdurre un tempo di attesa tra acquisizioni di uno stesso ciclo ma l'applicazione PAUSA.EXE a cui è delegato questo compito non è presente nella directory di acquisizione. Occorre installare nuovamente il software

**File PLOTCHN.EXE non trovato.**

- Messaggio visualizzato durante l'esecuzione del modulo MG.EXE. Si è nell'impossibilità di elaborare i files di spettro creati dal software della ORTEC in quanto il modulo PLOTCHN.EXE non è presente nella directory corrente. Occorre installare nuovamente il software.

**File READ.EXE non trovato.**

- Messaggio visualizzato durante l'esecuzione del modulo CHECKCHN.EXE. Si è nell'impossibilità di verificare i files di spettro creati dal software della ORTEC in quanto il modulo READ.EXE non è presente nella directory corrente. Occorre installare nuovamente il software.
- Messaggio visualizzato durante l'esecuzione del modulo PLOTCHN.EXE. Si è nell'impossibilità di interpretare i files di spettro creati dal software della ORTEC in quanto il modulo READ.EXE non è presente nella directory corrente. Occorre installare nuovamente il software.

**File riepilogativo non salvato. Impossibile continuare.**

- Messaggio mostrato dal modulo MAKEPLOT.EXE poiché si è rifiutato di salvare un file riepilogativo: questo è essenziale ai fini delle elaborazioni successive. Questo tipo di

errore può anche essere provocato intenzionalmente per terminare l'esecuzione del modulo MAKEPLOT.EXE.

**File SER\_COMM.EXE non trovato. Impossibile gestire serialmente i dati.**

- Messaggio visualizzato durante l'esecuzione dell'applicazione CAE.EXE (opzione J) se l'applicazione SER\_COMM.EXE non è presente nella directory di acquisizione. Occorre installare nuovamente il software.

**File SER\_ING.EXE non trovato. Impossibile acquisire serialmente i dati.**

- Messaggio visualizzato durante l'esecuzione dell'applicazione SER\_COMM.EXE se l'applicazione SER\_ING.EXE non è presente nella directory di acquisizione. Si fa presente che al momento non si dispone delle specifiche di funzionamento della versione aggiornata del Pulse Counter dell'I.N.G. pertanto è normale che venga mostrato questo avviso.

**File SERTESYS.EXE non trovato. Impossibile acquisire serialmente i dati.**

- Messaggio visualizzato durante l'esecuzione dell'applicazione SER\_COMM.EXE se l'applicazione SERTESYS.EXE non è presente nella directory di acquisizione. Occorre installare nuovamente il software.

**File SETSTART.EXE non trovato.**

- Messaggio visualizzato durante la creazione del file di comando (applicazione EDITOR.EXE) quando si desidera avviare il ciclo di misure ad un orario stabilito ma l'applicazione SETSTART.EXE a cui è delegato questo compito non è presente nella directory di acquisizione. Occorre installare nuovamente il software.

**File SETUPMCS.EXE non trovato. Impossibile continuare.**

- Messaggio visualizzato durante l'esecuzione dell'applicazione MAKEPLOT.EXE se l'applicazione SETUPMCS.EXE non è presente nella directory di acquisizione. Occorre installare nuovamente il software.

**File SETUPMCS.EXE non trovato. Impossibile impostare il separatore decimale.**

- Messaggio visualizzato durante l'esecuzione dell'applicazione CAE.EXE (opzioni E e K) se l'applicazione SETUPMCS.EXE non è presente nella directory di acquisizione. Occorre installare nuovamente il software.

**Files ZIP non trovati nella directory corrente.**

- Messaggio che compare durante l'esecuzione dell'applicazione CAE.EXE (opzione G) se non è stato trovato alcun file da decomprimere nella directory di acquisizione.
- Messaggio che compare durante l'esecuzione dell'applicazione CAE.EXE (opzione H) se non è stato trovato alcun file compresso da mostrare nella directory di acquisizione.
- Messaggio che compare durante l'esecuzione dell'applicazione CAE.EXE (opzione I) se non è stato trovato alcun file compresso da cancellare nella directory di acquisizione.

**Il file compresso *Nomefile.ZIP* non è stato creato.**

- Messaggio mostrato dal modulo CAE.EXE (opzione F) allorché non sia stato possibile convertire i files acquisiti in un file compresso. Ciò può essere dovuto alla mancanza dell'applicazione di compressione PKZIP.EXE o ad un suo “mascheramento” dovuto al fatto che il nome della directory in cui è installata non compare nell'istruzione PATH del file *AUTOEXEC.BAT*

**Il file di comando EXEC.TXT non è stato trovato. Impossibile compilare.**

- Questo messaggio di errore compare quando si tenta di compilare un file di comando non presente nella directory di acquisizione.

**Il file di comando EXEC.TXT non prevede reports. Impossibile continuare.**

- Questo messaggio di errore, generato dall'applicazione MAKEPLOT.EXE durante l'analisi del file *EXEC.TXT*, compare quando si tenta di elaborare reports che non sono stati creati.

**Il file di comando EXEC.TXT non è stato trovato. Impossibile continuare.**

- Questo messaggio di errore compare quando il file di comando *EXEC.TXT* non è presente nella directory di acquisizione. Esso viene mostrato durante l'esecuzione del modulo MAKEPLOT.EXE quando si tenta di leggere il valore del tempo di acquisizione dati necessario ai fini del calcolo del valore di concentrazione corrispondente a ogni singolo conteggio.

**I files di spettro non sono stati creati. Impossibile cancellare.**

- Messaggio mostrato dal modulo MG.EXE allorché nel creare il file di comando non si è richiesto il salvataggio di files di spettro, pertanto non possono essere cancellati.

**Il file FONDOINF.DAT non è stato trovato. Parametro per FONDO.EXE mancante.**

- Questo messaggio di errore dell'applicazione CAE.EXE (opzione B) può comparire fintanto che non viene accettata almeno una volta la richiesta di interruzione dell'elaborazione dati per acquisire il fondo.

**Il file *Nomefile.ARC* è di nuovo tipo. Impossibile elaborarlo con OLDVIEW.EXE**

- Messaggio di errore autoesplicativo generato dall'applicazione OLDVIEW.EXE

**Impossibile apportare correzioni ai parametri temporali impostati.**

- Messaggio che compare durante l'esecuzione dell'applicazione CALIBRA.EXE se non è possibile correggere il tempo di attesa tra cicli successivi o il tempo di pausa tra acquisizioni di uno stesso ciclo per il tempo morto del sistema di acquisizione dovuto ad operazioni di lettura/scrittura.

**Impossibile calibrare. Richiesta di reports non presente in EXEC.TXT**

- Messaggio che compare durante l'esecuzione dell'applicazione CALIBRA.EXE se si è appena creato un file di comando che non prevede reports.

**Impossibile creare il file compresso.**

- Messaggio che compare durante l'esecuzione dell'applicazione CAE.EXE (opzione F) se non è stato portato a termine alcun ciclo completo di misure.

**Inconsistenze tra i files che caratterizzano le misure. Impossibile calibrare**

- Messaggio che compare durante l'esecuzione dell'applicazione CALIBRA.EXE al momento del controllo di consistenza delle informazioni contenute nei files *EXEC.TXT*, *CLOCK.DAT* e *INFOWAIT.DAT*

**Inconsistenze tra i reports acquisiti. Impossibile calibrare**

- Messaggio che compare durante l'esecuzione dell'applicazione CALIBRA.EXE al momento del controllo di consistenza delle informazioni temporali contenute nei reports di calibrazione.

**I reports non sono stati creati. Impossibile cancellare.**

- Si è tentato di cancellare reports che non possono essere stati generati dal software della ORTEC in quanto l'utente non ne ha richiesto la creazione.

**Nel file EXEC.TXT non sono stati richiesti reports. Impossibile calibrare**

- Messaggio che compare durante l'esecuzione dell'applicazione CALIBRA.EXE al momento del controllo di validità del file di comando ai fini della calibrazione.

**Nessun file CHN trovato.**

- Messaggio mostrato dal modulo CHECKCHN.EXE. Si è tentato di verificare il contenuto dei files di spettro ancor prima che il software della ORTEC li abbia creati.
- Messaggio mostrato dal modulo PLOTCHN.EXE. Si è tentato di elaborare i files di spettro ancor prima che il software della ORTEC li abbia creati.
- Messaggio mostrato dal modulo PLOTCHN.EXE. Si è cercato di elaborare i files di spettro dopo averli già cancellati tutti.

**Nessun ROI file selezionabile trovato.**

- Durante la creazione del file di comando *EXEC.TXT* si è richiesto di selezionare un certo range di canali di integrazione per il conteggio ma non è presente alcun file (ROI) che contenga tale informazione.

**Nessuna ROI impostata nel file di comando EXEC.TXT. Impossibile continuare.**

- Messaggio di errore generato dall'applicazione FONDO.EXE. Impossibile determinare il fondo senza un intervallo di canali su cui integrare.

**Nome di file già in uso.**

- Durante la creazione del file di comando *EXEC.TXT* si è richiesto di creare uno o più files di spettro con un nome di file già in uso nella directory corrente.
- Durante la creazione del file di comando *EXEC.TXT* si è richiesto di creare i reports con un nome di file già usato nella directory corrente.
- Si tenta di assegnare ad un file compresso contenente i files acquisiti durante un ciclo di misure un nome di file già in uso.
- Si tenta di assegnare ad un file riepilogativo di acquisizione seriale (\*.GPC) un nome di file già in uso.

**Nome di file già in uso a reports o spettri.**

- Quando il messaggio è generato dall'applicazione CAE.EXE si è scelto di creare un file compresso contenente i files acquisiti durante un ciclo di misure con un nome di file già in uso a reports o spettri. Occorre cambiare il nome.
- Quando il messaggio è generato dall'applicazione MAKEPLOT.EXE si è scelto di creare un file dati riepilogativo con un nome di file già in uso a reports o spettri. Occorre cambiare il nome.
- Quando il messaggio è generato dall'applicazione PLOTCHN.EXE si è scelto di creare un file di spettro in formato ASCII con un nome di file già in uso a reports o spettri. Occorre cambiare il nome.

**Non è stato possibile aggiornare il separatore decimale nel file *Nomefile.ARC***

- Messaggio di errore che è causato dall'applicazione CAE.EXE (opzione E) nel caso in cui
  - non c'è alcun file ARC nella directory di acquisizione
  - il file ARC selezionato non è valido
  - il file ARC selezionato è di vecchio tipo

**Non tutti i reports *Nomefile.\** sono stati trovati.**

- Messaggio di errore che è causato dall'applicazione MAKEPLOT.EXE quando sono stati trovati meno files di report di quanto atteso. L'esecuzione proseguirà dando indicazioni su come risolvere tale incongruenza.

**Occorre creare il file di comando EXEC.TXT. Impossibile continuare.**

- Messaggio di errore generato dall'applicazione FONDO.EXE se non viene trovato il file di comando necessario per l'individuazione dei parametri temporali con cui acquisire il fondo.

**Parametri temporali impostati incompatibili con la procedura di calibrazione**

- Messaggio che compare durante l'esecuzione dell'applicazione CALIBRA.EXE se nel file di comando non è previsto un tempo di attesa tra cicli successivi né un tempo di pausa tra acquisizioni di uno stesso ciclo.

**Reports *Nomefile.\** non trovati. Impossibile cancellare.**

- Messaggio mostrato dal modulo MG.EXE. Si è tentato di cancellare i reports ancor prima che il software della ORTEC li abbia creati.
- Messaggio mostrato dal modulo MG.EXE. Si è cercato di cancellare i reports dopo averli già cancellati tutti.

**Reports *Nomefile.\** non trovati. Impossibile elaborare.**

- Messaggio mostrato dall'applicazione MAKEPLOT.EXE quando

- si è tentato di elaborare i reports ancor prima che il software della ORTEC li abbia creati;
- si è cercato di elaborare (nuovamente) i reports dopo averli già cancellati tutti;
- contrariamente a quanto atteso i reports non si trovano nella directory di acquisizione

**Reports non creati. Impossibile elaborarli.**

- Messaggio mostrato dal modulo MAKEPLOT.EXE. È causato dal fatto che nel creare il file di comando non si è richiesto il salvataggio di reports.

**Sono state completate soltanto \*\*\* serie di misure delle \*\*\* previste.**

- Messaggio che compare durante l'esecuzione dell'applicazione CAE.EXE (opzione F) se sono stati portati a termine soltanto \*\*\* cicli completi di misure degli \*\*\* previsti.

**Stampante non pronta, annullare o riprovare ?**

- Durante l'esecuzione del modulo MG.EXE si è richiesta la stampa dei dati memorizzati in un file (ARC) riepilogativo ma la stampante può
  - essere spenta
  - essere OFF LINE
  - priva di carta
  - aver esaurito la carta durante la stampa
- Durante l'esecuzione del modulo MAKEPLOT.EXE si è richiesta la stampa dei dati ottenuti dall'elaborazione dei reports ma la stampante può
  - essere spenta
  - essere OFF LINE
  - priva di carta
  - aver esaurito la carta durante la stampa



## APPENDICE A

### Guida all'impostazione ed esecuzione di un ciclo di misure con il GPC-1

1. Collegare GPC-1 ad una porta seriale disponibile del PC (è consigliabile eseguire questa operazione a computer spento);
2. Se il GPC-1 è alimentato in rete accendere l'interruttore posteriore per assicurare una costante ricarica della batteria interna;
3. Accendere l'interruttore posto sul pannello frontale;
4. Entrare nel *Setup* premendo i pulsanti NEXT (il cursore si sposta da *Meas* a *Setup*) ed ENTER;
5. Digitare il codice di accesso, generalmente dato dalla sequenza INCR - NEXT - INCR - ENTER;
6. Selezionare come unità di misura i *Conteggi*, eventualmente usare il pulsante INCR per modificare l'unità mostrata, e premere ENTER;
7. Assicurarsi che il valore limite dei conteggi sia adeguato (il default è di 200000) e premere ENTER. Nel caso si debba modificare tale valore ci si posiziona sulle cifre con il pulsante NEXT, si modificano premendo il pulsante INCR; tale procedura si intende valida anche per la modifica degli altri parametri programmabili a seguire;
8. Impostare il numero di cicli desiderato ed abilitare l'output dei dati;
9. Impostare il tempo di acquisizione ed eventualmente quello di attesa tra acquisizioni successive;
10. Impostare l'output dei dati su *HOST*;
11. Impostare il BAUD di trasmissione seriale a 9600 N,8,1;
12. Correggere eventualmente data e ora;
13. Avviare il ciclo di misure selezionando *Meas* e premendo il pulsante ENTER; verrà mostrato il numero di cicli richiesto e quello dei cicli che saranno ancora disponibili al termine. Premere ENTER ed accettare lo *Start* premendo nuovamente ENTER;
14. Al termine del ciclo di misure premere il pulsante ESC per prepararsi alla trasmissione seriale dei dati verso il PC