

Impatto della presenza di thoron sulle prestazioni dei monitor attivi per la misura della concentrazione di radon in continuo

Venoso G.¹, Di Carlo C., Ampollini M., Antignani S., Carpentieri C., Caprio M., Bochicchio F.

¹*Istituto Superiore di Sanità, Centro Nazionale per la Protezione dalle Radiazioni e Fisica Computazionale, Viale Regina Elena 299, 00161, Roma*

gennaro.venoso@iss.it

Abstract

Le prestazioni dei monitor attivi per la misura della concentrazione di radon in continuo (*Continuous Radon Monitors – CRMs*) sono generalmente valutate (ad esempio, in termini di accuratezza, linearità della risposta e influenza dei differenti parametri climatici) in condizioni controllate all'interno di *camere radon*, spesso anche nell'ambito di interconfronti. In alcuni casi, tali interconfronti hanno stimato anche l'impatto della presenza di thoron (interferenza al thoron) sulla risposta dei CRMs, generalmente tramite esposizioni dei rivelatori a concentrazioni note di thoron all'interno di *camere thoron* in cui la concentrazione di radon ha valori molto bassi.

Tuttavia, negli ambienti indoor sono presenti, a concentrazioni variabili, sia il radon che il thoron e, pertanto, le stime di interferenza al thoron riportate in letteratura non sono generalmente applicabili per valutare l'impatto della presenza di thoron sulla risposta dei CRMs posizionati all'interno dei suddetti ambienti.

Per questo motivo, uno studio sperimentale è stato condotto in un ambiente indoor con concentrazioni attese di radon e thoron (in prossimità delle pareti) medio-alte finalizzato alla valutazione dell'interferenza al thoron dei seguenti quattro CRMs: 1) AlphaGUARD PQ2000PRO; 2) AlphaGUARD D50; 3) RadonEye+ e 4) TERA–TSR2. La concentrazione di thoron è stata valutata per mezzo di due monitori attivi: RAD7 e AlphaGUARD DF2000.

Inoltre, per i CRMs con interferenza al thoron stimata essere non trascurabile, si è proposto un metodo indiretto per la valutazione della concentrazione del thoron mediante l'uso di due dispositivi identici posizionati in diversi punti della stanza: i) uno in prossimità delle pareti; ii) uno al centro della stanza.

INTRODUZIONE

L'uso di dispositivi attivi per la misura della concentrazione di radon indoor (*Continuous Radon Monitors – CRMs*) sta diventando sempre più diffuso, non solo nell'ambito delle attività connesse al risanamento degli edifici per la valutazione dell'efficacia a breve termine, ma anche per la valutazione dell'effettiva esposizione dei lavoratori durante le ore di lavoro (Bucci et al., 2019).

Tale diffusione è dovuta soprattutto alla presenza sul mercato di *CRMs* economici che consentono di effettuare il monitoraggio della concentrazione di radon in continuo a costi contenuti anche in un grande numero di locali di una sede di lavoro.

Le prestazioni di tali monitor, però, necessitano di un'attenta valutazione in termini di precisione, accuratezza e linearità della risposta degli strumenti. Generalmente tali valutazioni vengono effettuate per mezzo di interconfronti in camere radon (Beck et al., 2009; Carmona and Kearfott, 2019; Vargas and Ortega, 2006). In alcuni casi, tali interconfronti hanno consentito di valutare anche l'interferenza al thoron dei dispositivi, fenomeno che produce generalmente una sovrastima della reale concentrazione di radon indoor in ambienti nei quali la concentrazione di thoron non è trascurabile, soprattutto in prossimità delle pareti.

La valutazione dell'interferenza al thoron viene effettuata generalmente esponendo i *CRMs* ad atmosfere di thoron (all'interno di camere thoron) e misurando la concentrazione che gli strumenti attribuiscono erroneamente al radon (Beck et al., 2009). L'interferenza al thoron è presente soprattutto per quei monitor che operano in flusso e che non consentono di effettuare analisi spettrometrica delle energie alfa emesse dai prodotti del decadimento del radon e del thoron (Kochowska et al., 2009; Sumesh et al., 2013). Tuttavia, anche per i monitor a diffusione, concentrazioni di thoron elevate – non infrequenti al sud e centro Italia per la presenza di tufo e pozzolana come materiali da costruzione (Bochicchio et al., 1996) – possono contribuire in maniera rilevante a sovrastimare l'effettiva concentrazione di radon degli ambienti oggetto delle misure.

L'obiettivo principale del presente lavoro è la valutazione dell'interferenza al thoron da parte di quattro tipologie di *CRMs*, di cui due costituite da strumenti a basso costo, esposti in ambienti indoor in cui sono presenti sia il radon che il thoron.

MATERIALI E METODI

Gli esperimenti per la valutazione dell'interferenza al thoron sono stati effettuati prendendo in considerazione quattro diversi dispositivi CRMs prodotti da tre diverse aziende (Tabella 1). Il principio di funzionamento di tre dispositivi è la camera a ionizzazione che non consente, però, di discriminare le energie alfa emesse dal thoron e dai suoi prodotti del decadimento. Invece, il CRM della Tesla (modello *TSR2*) si basa sul principio di funzionamento della raccolta elettrostatica dei prodotti del decadimento del radon (e del thoron) su un fotodiode consentendo l'acquisizione di uno spettro di energia e, quindi, in linea di principio di discriminare il radon dal thoron. Tuttavia, non sempre la possibilità da parte di uno strumento di produrre uno spettro consente una completa discriminazione del thoron dal radon (Vargas and Ortega, 2006).

Tabella 1 - Elenco dei dispositivi attivi oggetto dell'esperimento per la valutazione dell'interferenza al thoron.

Nome del dispositivo	Modello	Produttore	Principio di funzionamento	Efficienza di rivelazione cph/100 Bq m ⁻³
AlphaGUARD	PQ2000 Pro	Saphymo	Camera a ionizzazione	300
AlphaGUARD	D50	Saphymo	Camera a ionizzazione	300
Tera	TSR2	TESLA	Camera a raccolta elettrostatica	25
RadonEye+	RD200P	FTLAB	Camera a ionizzazione	81

L'esperimento si è articolato nelle seguenti due fasi:

Fase 1. Interconfronto tra i dispositivi al centro della stanza, in presenza di una concentrazione di thoron trascurabile

Obiettivo di tale interconfronto è quello di valutare la risposta dei rivelatori in presenza del solo gas radon, assumendo che la concentrazione di thoron lontano dalle pareti sia generalmente trascurabile (Nucetelli and Bochicchio, 1998).

La necessità di questo interconfronto è anche quella di testare (ed eventualmente modificare) il fattore di taratura dei CRMs *TSR2* e *RadonEye+*, per i quali le aziende produttrici non hanno fornito un certificato di calibrazione.

Si sono assunti, a tale scopo, come strumenti di riferimento gli *AlphaGuard* (di entrambi i modelli) e la concentrazione di radon di riferimento pari alla media delle concentrazioni misurate dagli *AlphaGuard*. 8 CRMs (4 coppie di ciascuna tipologia) sono stati posizionati al centro della stanza (a distanze maggiori di 150 cm dalle pareti) per circa 7 giorni. Una volta analizzati i risultati di questo interconfronto, si è proceduto alla valutazione del possibile effetto del thoron sulla risposta dei monitor attivi (fase 2)

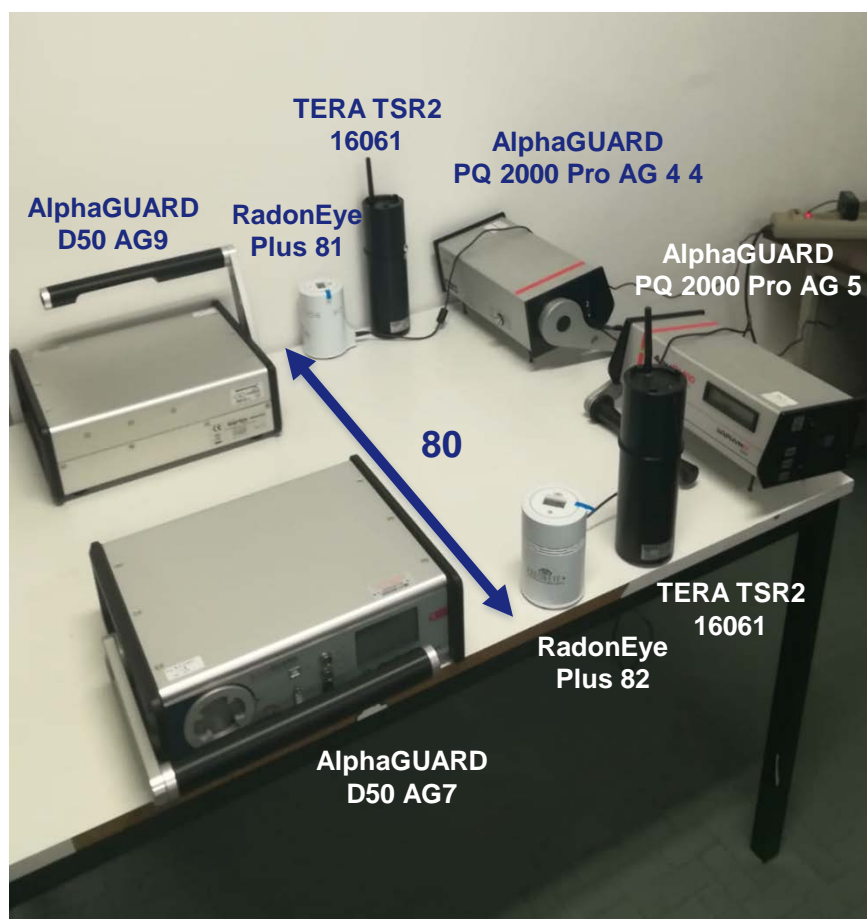
Fase 2. Valutazione dell'interferenza al thoron delle quattro coppie di CRMs

Per tutte le 4 tipologie di CRMs prese in esame, coppie di dispositivi sono state posizionate a diverse distanze dalla parete: una è stata posta a circa 2 cm dalla parete (di seguito tale posizione sarà denominata "a contatto") e l'altra a circa 80 cm (posizione di seguito denominata "a distanza").

I TERA TSR2 ed i RadonEye+ operano solo in diffusione (*diffusion mode*). Invece, gli *AlphaGuard* in linea di principio possono operare anche a flusso, ma in questo esperimento si è valutata la loro risposta solo in diffusione.

L'esposizione è durata complessivamente circa 7 giorni. A fini di verifica dei risultati ottenuti, un'esposizione successiva alla prima, della stessa durata, è stata effettuata invertendo la posizione delle coppie di dispositivi.

Figura 1 – Disposizione delle quattro coppie di monitor attivi utilizzati per la valutazione dell'interferenza al thoron.



Per ciascuno dei monitor sono stati acquisiti gli andamenti orari e, in caso di differenze tra le coppie degli stessi dispositivi statisticamente significative, si è stimata l'interferenza al thoron misurando successivamente la concentrazione di thoron con due strumenti differenti: il RAD7, (prodotto dalla *DurrIDGE*) e l'AlphaGuard DF2000 (prodotto dalla *Saphymo*).

Si è scelto di non effettuare le misure di thoron in contemporanea con i suddetti test di interferenza per evitare di perturbare le condizioni sperimentali, considerando che le misure di thoron sono eseguite con strumenti che lavorano a flusso e che, quindi, potrebbero in linea di principio alterare la diffusione all'interno dei CRMs presi in esame.

RISULTATI E DISCUSSIONE

INTERCONFRONTO AL CENTRO DELLA STANZA

I risultati dell'interconfronto al centro della stanza (*Fase 1* dell'esperimento) sono sinteticamente illustrati in Tabella 2, in cui sono riportati i valori di concentrazione di radon media per ciascuno degli strumenti esposti. Per quanto riguarda gli AlphaGuard ed i RadonEye+, si può notare che l'accordo tra differenti strumenti della stessa tipologia è buono (entro l'intervallo di confidenza al 95%). Invece i TERA hanno tra loro una differenza tra i valori medi (anche se di poco) statisticamente significativa.

Tabella 2 - Risultati dell'interconfronto (lontano dalle pareti) tra differenti strumenti di misura attivi per la misura della concentrazione di radon

Modello del dispositivo	Identificativo dispositivo	Concentrazione media di radon (Bq m ⁻³)	Standard Error (Bq m ⁻³)	95% CI
AlphaGuard-D50	AG9	220	2	(215–225)
AlphaGuard-PQ 2000 PRO	AG4	227	2	(223–230)
	AG5	227	3	(222–232)
RadonEye+	RnEye_082	241	3	(235–247)
	RnEye_081	247	3	(241–253)
TERA-TSR2	T15083	202	3	(195–208)
	T16061	218	3	(211–225)

Osservando, quindi, che le medie dei RadonEye+ e dei TERA differiscono (in maniera significativa) da quelle degli AlphaGuard (considerati come strumento di riferimento), si è proceduto al calcolo del nuovo fattore di calibrazione per questi strumenti.

VALUTAZIONE DELL'INTERFERENZA AL THORON DEI CRMs

Successivamente, una volta tarati i TERA ed i RadonEye+, le quattro coppie di CRMs di differente tipologia sono state esposte, così come descritto nella sezione precedente (Figura 1), per circa 7 giorni ponendo, per ciascuna di tali tipologie, uno strumento a *distanza* (a 80 cm dalla parete) ed uno a *contatto* con la parete (a 2 cm). I risultati, in termini di concentrazione media di radon, sono riportati in Tabella 3.

Tabella 3 - Risultati delle misure di concentrazione di radon (della durata di 7 gg) a *contatto* (a 2cm dalla parete) ed a *distanza* (a 80 cm) dalla parete per ciascuna coppia degli strumenti presi in esame (*primo test*).

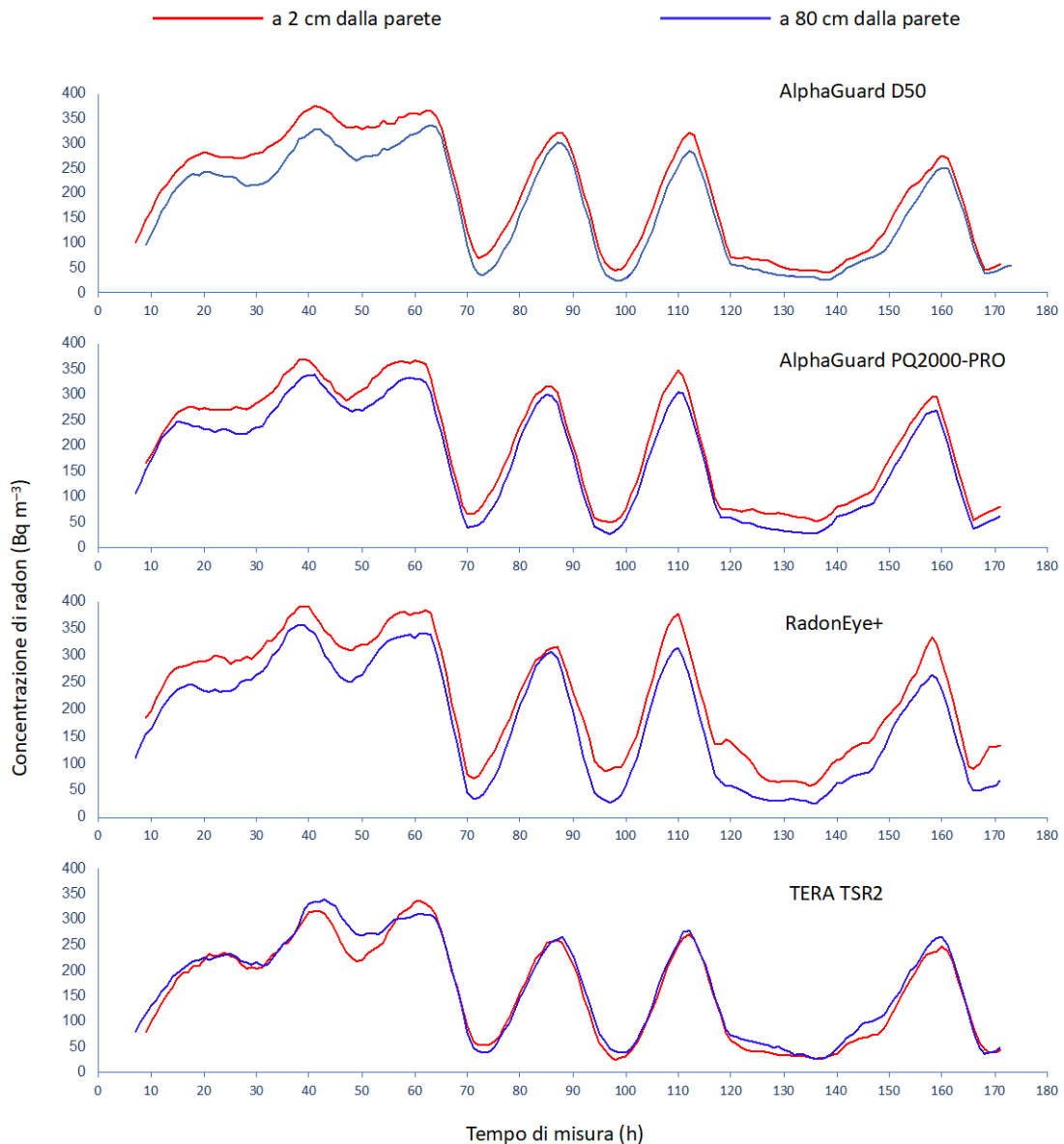
Modello del dispositivo	Concentrazione media di radon (Bq m ⁻³) a <i>distanza</i>	Concentrazione media di radon (Bq m ⁻³) a <i>contatto</i>	Differenza tra misure a contatto ed a distanza (Bq m ⁻³)	95% CI
AlphaGuard-D50	165 ± 9	198 ± 9	33 ± 13	(8–58)
AlphaGuard-PQ 2000 PRO	170 ± 9	198 ± 9	28 ± 12	(3–53)
RadonEye+	175 ± 9	220 ± 9	45 ± 13	(20–70)
TERA-TSR2	157 ± 6	165 ± 8	9 ± 10	(-11–29)

N.B. La differenza tra le misure a contatto ed a distanza è attribuibile alla presenza di thoron.

Come si evince dalla Tabella 3, sia per gli AlphaGuard che il RadonEye+, la differenza tra la concentrazione di radon a *contatto* ed a *distanza* è significativamente maggiore di zero, indice di un fenomeno di interferenza del thoron. Inoltre, per le due tipologie di AlphaGuard (D50 e

PQ 2000 PRO) le minime differenze riscontrate (non significative da un punto di vista statistico) confermano quanto riportato sul manuale del produttore relativamente al fatto che il volume sensibile degli strumenti (incluso il filtro di ingresso per l'aria ed il radon) sia lo stesso.

Figura 2 - Per ciascuna tipologia di CRM presi in esame sono riportati gli andamenti della concentrazione di radon misurata con uno strumento a 2 cm dalla parete (in blu) ed a distanza (a 80 cm) dalla parete (in rosso).



N. B: Per meglio evidenziare le differenze tra coppie di dispositivi, per ciascun CRM è riportata la media mobile della concentrazione di radon (centrata di ordine 7).

Invece, per il TERA-TSR2, le differenze tra le due coppie di strumenti sembrano non essere compatibili con un fenomeno di interferenza al thoron. I risultati di Tabella 3 sono confermati anche dagli andamenti temporali riportati in Figura 2, dai quali si nota che, per gli AlphaGuard e per i RadonEye+, il dispositivo a contatto misura sistematicamente di più rispetto a quello posto a circa 80 cm dalle pareti.

Infine, per verificare i risultati di Tabella 3 e Figura 2, un'ulteriore esposizione (*secondo test*) è stata effettuata con gli stessi strumenti (ad eccezione dell'*AlphaGuard PQ 2000 PRO* ritenuto, come detto indistinguibile per quanto riguarda l'effetto di interferenza al thoron con il modello più recente *D50*). In tale esposizione di verifica, per ciascuna delle tipologie di CRMs, la posizione delle coppie usata per il primo esperimento è stata invertita: in altri termini, il CRM prima posizionato a distanza dalla parete è stato posizionato a contatto, e viceversa.

Anche per questo secondo test la durata dell'esposizione è stata di circa 7 gg.

Come si nota dalla Tabella 4 i risultati del secondo test confermano quelli del primo, e cioè che, ad eccezione del TERA-TSR2, sia l'*AlphaGuard* (in diffusion mode) che il *RadonEye+* sono sensibili al thoron.

Tabella 4 - Risultati delle misure di concentrazione di radon (della durata di 7 gg) *a contatto* (a 2cm dalla parete) ed a *distanza* (a 80 cm) dalla parete per ciascuna coppia degli strumenti presi in esame (*secondo test*)

Modello del dispositivo	Concentrazione media di radon (Bq m ⁻³) a distanza	Concentrazione media di radon (Bq m ⁻³) a contatto	Differenza tra misure a contatto ed a distanza (Bq m ⁻³)	95% CI
AlphaGuard-D50	162 ± 8	193 ± 8	31 ± 11	(9-54)
RadonEye+	176 ± 8	220 ± 8	44 ± 12	(21-68)
TERA-TSR2	168 ± 6	162 ± 7	-6 ± 11	(-28-15)

N.B. La differenza tra le misure a contatto ed a distanza è attribuibile alla presenza di thoron.

Al fine di valutare quantitativamente l'interferenza al thoron dei CRMs oggetto di studio, sono state effettuate misure di thoron a 2 cm dalla parete in prossimità delle posizioni in cui sono stati collocati i CRMs nel corso dei test per la valutazione dell'interferenza.

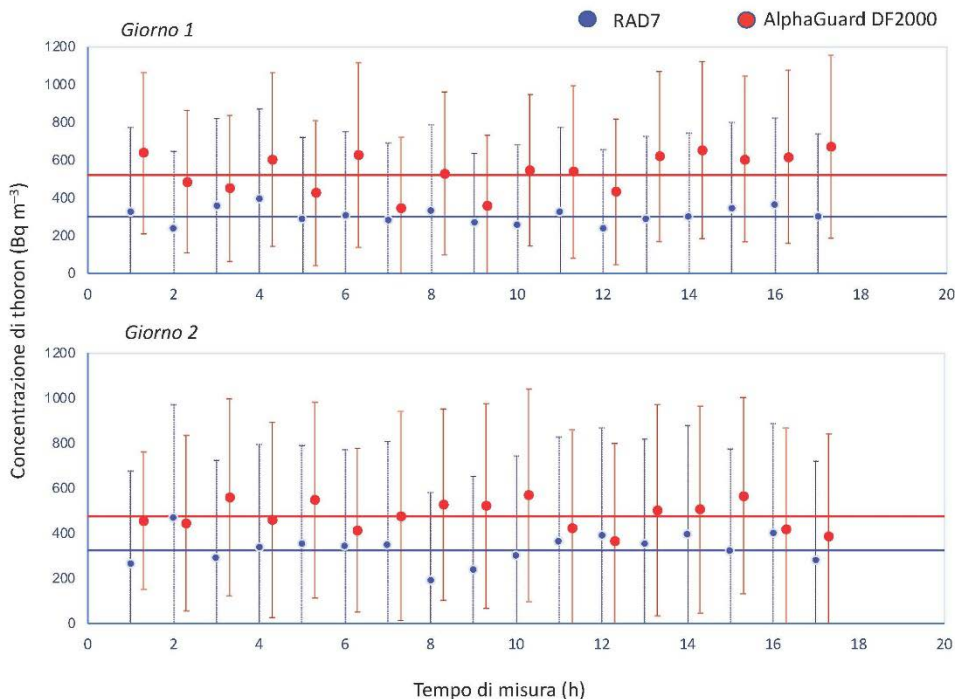
Tabella 5 - Risultati delle misure di concentrazione di thoron effettuate a 2 cm dalla parete in prossimità della quale sono stati condotti gli esperimenti per la valutazione dell'interferenza al thoron dei CRMs.

Modello del dispositivo	Concentrazione di thoron (Bq m ⁻³) <i>Giorno 1</i>	Concentrazione di thoron (Bq m ⁻³) <i>Giorno 2</i>	Concentrazione di thoron (Bq m ⁻³) <i>Media Giorni 1 e 2</i>
AlphaGuard-DF2000	521 ± 102	476 ± 103	499 ± 72
RAD7	302 ± 106	324 ± 108	313 ± 76
	Media (RAD7, AG DF2000)		406 ± 51

Dai risultati in Tabella 5 e dalla Figura 3 si può notare che la concentrazione di thoron misurata dal RAD7 risulta sistematicamente inferiore (di circa il 40%) rispetto a quella misurata con l'*AlphaGuard DF2000*. Si può notare, inoltre, che, per entrambi gli strumenti, la concentrazione media di thoron misurata nel corso del primo giorno non varia sensibilmente rispetto alla misura del secondo giorno. La concentrazione di thoron (in un fissato punto di misura indoor),

inoltre, è meno variabile rispetto a quella di radon. Infatti, la concentrazione di thoron è poco influenzata dalla ventilazione degli ambienti in virtù del fatto che la sua costante di decadimento (64 h^{-1}) è molto più alta dei normali ratei di ventilazione che si riscontrano negli ambienti indoor ($\sim 1 \text{ h}^{-1}$) (Nuccetelli and Bochicchio, 1998). Per questo motivo, si è assunta approssimativamente costante la concentrazione di thoron nel corso delle misure di interferenza al thoron dei CRMs.

Figura 3 – Confronto tra l'andamento della concentrazione di thoron misurata a 2 cm dalla parete da RAD7 e AlphaGuard DF2000 in due giorni differenti. Le linee orizzontali indicano i valori medi



Tuttavia, non essendoci accordo tra i valori misurati dall'AG DF 2000 e quelli del RAD7 e, non essendoci motivi *a priori* per prediligere uno strumento all'altro, si è scelto di utilizzare la media dei due strumenti (riportata in Tabella 5) come valore di riferimento della concentrazione di thoron (misurata *a contatto* con la parete) da utilizzare per la stima approssimativa del valore di interferenza al thoron dei CRMs (vedi Tabella 6). In Tabella 6 è comunque riportato il range di concentrazione di thoron misurata con i due differenti strumenti e le stime di interferenza al thoron per i CRMs sono state fatte prendendo in considerazione tale range di valori.

Tali stime di interferenza al thoron sono state effettuate solo per l'AlphaGuard (in diffusion mode) e per il RadonEye+, cioè per quegli strumenti che hanno mostrato una significativa differenza tra le concentrazioni di radon misurate *a contatto* con la parete e quelle misurate a distanza (Tabella 3 e Tabella 4).

I valori di interferenza al thoron stimati per l'AlphaGuard *in diffusion mode* sono molto simili a quelli stimati in letteratura, pari a circa il 10% (Ishikawa, 2004; Sumesh et al., 2013). Invece, per quanto riguarda il RadonEye+, a conoscenza degli autori, non esistono valutazioni di interferenza precedenti al presente studio. Occorre evidenziare che strumenti come il RadonEye+ non hanno una batteria integrata, per cui funzionano solamente se collegate ad una presa di corrente: questo aumenta la probabilità di un loro posizionamento nei pressi di una parete.

D'altro canto, l'interferenza al thoron dei RadonEye+ potrebbe essere utilizzata per stimare in tempi rapidi e, soprattutto, a costi contenuti (rispetto a quelli degli strumenti attivi presenti in commercio per la misura della concentrazione di thoron) la presenza di thoron in un ambiente indoor in prossimità delle pareti: ciò può essere fatto posizionando un dispositivo a contatto con una parete e l'altro ad una congrua distanza (> 80–100 cm), e considerando che la concentrazione di thoron è proporzionale alla differenza della concentrazione di radon misurata dalla coppia di dispositivi.

Tabella 6 Stime di interferenza al thoron per gli strumenti AlphaGuard D50 e RadonEye+

Modello del dispositivo	Concentrazione di thoron assunta come riferimento (Bq m ⁻³)	Differenza tra misure di Rn a contatto ed a distanza (Bq m ⁻³)	Interferenza al thoron (%)
AlphaGuard-D50	406 (313–499)	32 ± 8	8% (6%–10%)
RadonEye+	406 (313–499)	45 ± 9	11% (9%–14%)

In letteratura non sono infrequenti, anche nel sud e centro Italia (Bochicchio et al., 1996), valori di concentrazione di thoron indoor superiore a 500–1000 Bq m⁻³ in prossimità delle pareti: in tali casi, strumenti con interferenza di circa il 10% porterebbero a sovrastimare la concentrazione di radon di oltre 50–100 Bq m⁻³. Pertanto, occorre prestare attenzione al posizionamento di tali strumenti in prossimità di sorgenti di thoron, come possono esserlo le pareti composte da materiali di costruzione (quali tufo e pozzolana) la cui emanazione di thoron spesso non può essere trascurata.

Infine, la valutazione dell'emanazione e/o dell'esalazione di radon da campioni di materiali è anch'essa soggetta a possibili sovrastime a causa dell'interferenza del thoron nel caso in cui l'esalazione di thoron dai campioni non sia trascurabile.

CONCLUSIONI

L'interferenza al thoron di dispositivi attivi per la misura della concentrazione di radon in continuo (CRMs) può produrre una sovrastima dell'effettiva concentrazione di radon misurata.

Il presente studio ha confermato la presenza di un'interferenza al thoron di circa il 10% per gli strumenti *AlphaGuard* (prodotti dalla Saphymo) che operano in diffusione ed ha stimato un'interferenza al thoron di poco più alta per i monitor RadonEye+ (prodotti dalla FTLAB). Invece, per gli strumenti TERA-TSR2 (prodotti dalla TESLA) non è stata stimata un'interferenza al thoron significativamente diversa da zero.

Protocolli di misura della concentrazione di radon con strumenti attivi "sensibili" anche al thoron dovrebbero prevedere, pertanto, indicazioni *ad hoc* sul posizionamento dei dispositivi ad una congrua distanza dalle pareti.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Beck, T.R., Buchröder, H., Schmidt, V., 2009. *Performance tests for instruments measuring radon activity concentration*. Appl. Radiat. Isot. 67, 876–880.
- Bochicchio, F., Venuti, G.C., Nuccetelli, C., Risica, S., Tancredi, F., 1996. *Indoor measurements of ^{220}Rn and ^{222}Rn and their decay products in a Mediterranean climate area*. Environ. Int. 22, 633–639.
- Bucci, S., Boccini, L., Corbani, E., Guazzini, M., Iacoponi, A., Pratesi, G., Bochicchio, F., Carpentieri, C., Venoso, G., Trevisi, R., Leonardi, F., 2019. *Sperimentazione di un protocollo di misura della concentrazione di radon in ambienti di lavoro in vista del recepimento della Direttiva 2013/59/Euratom*. Atti del Convegno Nazionale AIRP 2019.
- Carmona, M.A., Kearfott, K.J., 2019. *Intercomparison of Commercially Available Active Radon Measurement Devices in a Discovered Radon Chamber*. Health Phys. 116, 852–861.
- Ishikawa, T., 2004. *Effects of thoron on a radon detector of pulse-ionization chamber type*. Radiat. Prot. Dosimetry 108, 327–330.
- Kochowska, E., Kozak, K., Kozłowska, B., Mazur, J., Dorda, J., 2009. *Test measurements of thoron concentration using two ionization chambers AlphaGUARD vs. radon monitor RAD7*. Nukleonika 54, 189–192.
- Nuccetelli, C., Bochicchio, F., 1998. *The Thoron Issue: Monitoring Activities, Measuring Techniques and Dose Conversion Factors*. Radiat. Prot. Dosimetry 78, 59–64.
- Sumesh, C.G., Vinod Kumar, A., Tripathi, R.M., Puranik, V.D., 2013. *Comparison study and thoron interference test of different radon monitors*. Radiat. Prot. Dosimetry 153, 309–315. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncs118>
- Vargas, A., Ortega, X., 2006. *Influence of environmental changes on continuous radon monitors. Results of a Spanish intercomparison exercise*. Radiat. Prot. Dosimetry 121, 303–309.