

Recepimento della norma ISO 4037:2019 e stima della resistenza protettiva in un tubo radiogeno

Luigi Rinaldi¹, Claudia Silvestri¹ e Massimo Pinto¹

¹Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti (INMRI), ENEA C.R. Casaccia via Anguillarese 301, 00123 Roma

luigi.rinaldi@enea.it

Riassunto

Nel recepire la norma ISO 4037:2019 [ISO, 2019], nei laboratori di dosimetria dell'INMRI sono stati installati tra il 2021 e il 2023 dei partitori di tensione sulle macchine radiogene presenti. La norma ISO 4037 prescrive l'uso di un metodo di misura della differenza di potenziale tra catodo e anodo di un tubo a raggi X (potenziale del tubo) e raccomanda l'uso di partitori di tensione per misurarla. La norma chiede di verificare se esiste un circuito protettivo, che suppone essere una resistenza, e se esiste chiede di tenerne conto ma non specifica come e come questo influenzi misure di tensione. Per determinare il valore del potenziale del tubo, da cui dipenderà direttamente l'energia massima del fascio di fotoni X, la caduta di tensione causata dal circuito di protezione deve quindi essere determinata e compensata dal potenziale del generatore, quest'ultimo misurabile con dei partitori di tensione opportunamente tarati.

Il tubo radiogeno per la produzione di raggi X di medie energie del laboratorio dell'INMRI è dotato di circuito di protezione. Dal momento che il produttore del sistema completo di tubo più generatori non fornisce dettagli sullo schema di questo circuito, si è fatto ricorso ad un metodo sperimentale per la determinazione della caduta di potenziale che il circuito causa. Tale metodo si basa su uno spettrometro per determinare il valore dell'energia di "endpoint" dello spettro di fluena e stimare il potenziale del tubo.

I risultati ottenuti da questo studio possono essere usati da altri laboratori che hanno un tubo radiogeno con un circuito protettivo, per stimare le differenze tra il potenziale del tubo e del generatore.

Il metodo qui descritto potrebbe esser proposto per un prossimo aggiornamento della norma ISO 4037:2019.

INTRODUZIONE

La norma ISO 4037:2019 [ISO, 2019] è lo standard di riferimento per i laboratori di dosimetria che desiderano realizzare grandezze operative dosimetriche. La norma ISO 4037 prescrive l'uso di un metodo di misura della differenza di potenziale tra nodo e catodo del tubo radiogeno e raccomanda l'uso di partitori di tensione per misurare la differenza di potenziale applicata ai capi del tubo radiogeno. Questa differenza di potenziale applicata è una delle caratteristiche con cui vengono definite e identificate le qualità di radiazioni X oltre allo spessore emivalente ed alla filtrazione, e la sua misura -come prescritto nella ISO 4037:2019- deve essere riferibile. Tale caratteristica, la differenza di potenziale tra anodo e catodo, deve essere determinata entro limiti di incertezza tali che le grandezze dosimetriche operative possano essere realizzate con l'incertezza prescritta dalla norma ISO 4037:2019. Il motivo di questa prescrizione risiede nel peso che la differenza di potenziale avrà sullo spettro di fluena prodotto dal tubo radiogeno.

Nel recepire questa norma, nei laboratori di dosimetria dell'INMRI sono stati installati tra il 2021 e il 2023 dei partitori di tensione sulle macchine radiogene presenti. Inoltre, la norma ISO 4037:2019 specifica che la differenza di potenziale tra catodo e anodo di un tubo a raggi X (potenziale del tubo, V_{tube}) non è sempre uguale al 'potenziale del generatore', V_{gen} , cioè la differenza di potenziale che è possibile misurare tra i collegamenti elettrici ad alta tensione sull'esterno del tubo a raggi X. La norma chiede di verificare se esiste un circuito protettivo, che

suppone essere una resistenza e, se esiste, chiede di tenerne conto, ma non specifica come tale carico resistivo influenzi le misure di tensione.

Il tubo radiogeno per la produzione di raggi X di medie energie del laboratorio dell'INMRI è dotato di circuito di protezione. Dal momento che il produttore del sistema completo di tubo più generatori (WayGate Technologies, Titan ISOVOLT 450) non fornisce dettagli sullo schema di questo circuito, in questo studio si è fatto ricorso ad un metodo sperimentale per la determinazione della caduta di potenziale che il circuito causa. Lo scopo dello studio non è, quindi, caratterizzare il circuito di protezione, ma determinarne gli effetti sulla realizzazione dei fasci di radiazioni di cui alla ISO 4037:2019 e, tramite compensazioni, mitigarne gli effetti.

Dai dati sperimentali ottenuti si evince che la resistenza di buffer è, con ogni probabilità, installata in una parte del circuito non interessata dalla misura dei partitori. Questi ultimi, infatti, non sono in grado di osservare fenomeni di caduta di potenziale disponibile tra anodo e catodo e che sono collegati alla variazione della corrente anodica.

Il metodo utilizzato dall'INMRI per la determinazione del valore di questo resistore protettivo si basa su misure di spettrometria X.

Tale metodo si basa su uno spettrometro al Cadmio-Tellurio per la misura dello spettro di fluena dei fotoni. Tramite una taratura in energia, con sorgenti campione dell'INMRI, è possibile misurare il valore dell'energia di "endpoint" dello spettro di fluena (in keV), grazie al quale è possibile stimare il potenziale del tubo (in kV) e confrontarlo con il potenziale del generatore.

È noto che la tensione applicata ai capi del tubo radiogeno determina l'energia cinetica degli elettroni, che determina inoltre l'energia massima dei fotoni generata da una sorgente di raggi X. L'energia di endpoint è definita come la massima energia dei fotoni generati dal tubo radiogeno per un fissato valore di differenza di potenziale.

Il metodo descritto potrebbe essere usato da altri laboratori che hanno un tubo radiogeno in cui ci sia evidenza di un circuito protettivo, sia per stimare le differenze tra il potenziale del tubo e del generatore (dovute alla presenza della "resistenza di buffer") sia nella direzione di un prossimo aggiornamento/implementazione della norma ISO 4037:2019, dimostrando inoltre che l'uso dei soli partitori di tensione, che la norma raccomanda, non è sufficiente a descrivere e tenere conto del fenomeno di caduta di potenziale associata al circuito di protezione.

MATERIALI E METODI

In una sorgente di raggi X basata su un tubo radiogeno, è noto che la tensione applicata ai capi del tubo determina l'energia cinetica degli elettroni e che ciò, a sua volta determina l'energia massima dei fotoni generati dal tubo. L'energia di endpoint è definita come la massima energia dei fotoni generati dal tubo radiogeno per un fissato valore di differenza di potenziale tra anodo e catodo, V_{tube} .

Il tubo utilizzato in questo lavoro ha un anodo in Tungsteno ed una finestra di Berillio dello spessore di 3 mm.

I partitori di tensione, uno collegato al generatore di alta tensione positivo e uno collegato al generatore di alta tensione negativo (Waygate Technologies, High Voltage Divider), forniscono il valore della differenza di potenziale applicata al tubo. Come detto nell'introduzione, non si hanno sufficienti informazioni per stabilire a priori come è fatto il circuito di protezione all'interno del tubo, né dove questo sia esattamente posizionato.

Lo spettrometro utilizzato in questo studio ha un rivelatore a stato solido di Cadmio-Tellurio (AmpTek X-123, AMETEK), l'elettronica e il sistema di raffreddamento insieme al rivelatore sono contenute in un singolo alloggiamento di dimensioni ridotte che entra nel palmo di una mano. La ditta fornisce anche un kit di collimatori per collimare il fascio di raggi X di cui si voglia realizzare una misura spettrometrica. Questo sistema è composto da un cilindro cavo di Acciaio che al suo interno può ospitare diversi dischi di tungsteno, con lo scopo di ridurre la fluena di raggi X incidenti e permettere al rivelatore e all'elettronica di processare lo spettro. Lo strumento è stato

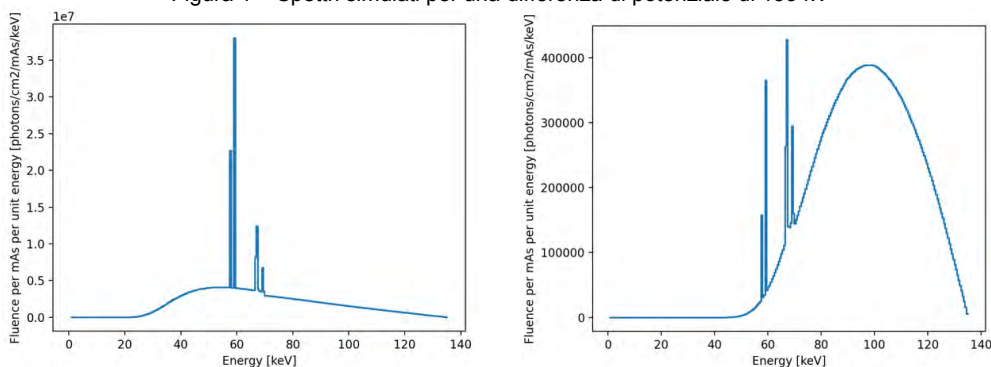
fornito con sette diversi dischi collimatori in tungsteno con differenti diametri di apertura, dal valore compreso tra $25 \mu\text{m}$ e $2000 \mu\text{m}$.

Lo spettrometro si posiziona sul fascio e con un puntatore laser si allinea il foro del collimatore lungo la direzione parallela all'asse longitudinale del fascio e lo si posiziona nel suo centro in maniera tale da consentire un adeguato allineamento tra il centro geometrico del fascio e le condizioni di buona geometria e di riferimento per la misura utilizzate dal CdTe come indicato nel suo manuale d'uso.

La qualità di radiazione usata per questa analisi è la CCRI-135[CCEMRI, 1972] definita da una differenza di potenziale di 135 kV ed una filtrazione addizionale di 2.225 mm Al+0.23 mm Cu.

Il pile-up è il rilevamento coincidente di due o più fotoni che danno come risultato la somma di tutta l'energia assorbita nel volume sensibile del rivelatore CdTe. In tal modo, due interazioni sono conteggiate come un unico evento la cui energia è sommata. La probabilità di un evento di pile up aumenta con il tasso di conteggio, e questo porta alla deformazione dello spettro di fluenza, anche con la creazione di una parte aggiuntiva dello spettro di fluenza a valori di energia superiori all'energia massima dei fotoni emessi dal tubo a raggi X. In questo studio, il numero di conteggi di pile-up è stato minimizzato mantenendo il tasso di conteggi inferiore a $1.5 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$ e controllando simultaneamente che il tempo morto sia inferiore al 10 %. Per tempo morto si intende la minima quantità di tempo da aspettare affinché due eventi siano registrati come separati. Per ottenere una adeguata riduzione del tasso di conteggi, e quindi la fluenza, in questo lavoro sono stati applicati diversi filtri realizzati con alluminio, rame e piombo. La distanza del rivelatore dal fuoco del tubo non è fissa, ed è stata aumentata all'aumentare della corrente anodica sempre al fine di ridurre la fluenza di fotoni incidenti perché grazie alla legge dell'inverso del quadrato della distanza la fluenza diminuisce di un fattore inversamente proporzionale al quadrato della distanza. I filtri applicati modificano la forma dello spettro poiché tagliano, selettivamente, la parte a bassa energia ("indurimento" del fascio o beam hardening) ma l'obiettivo di questo studio non è determinare la forma dello spettro di fluenza, bensì la sua energia di endpoint. Gli spettri così ottenuti dalla filtrazione appena descritta risultano relativamente stretti e presentano una ripida discesa nella parte terminale dello spettro (fig. 1, vedasi il confronto tra il pannello di sinistra e quello di destra).

Figura 1 – Spettri simulati per una differenza di potenziale di 135 kV



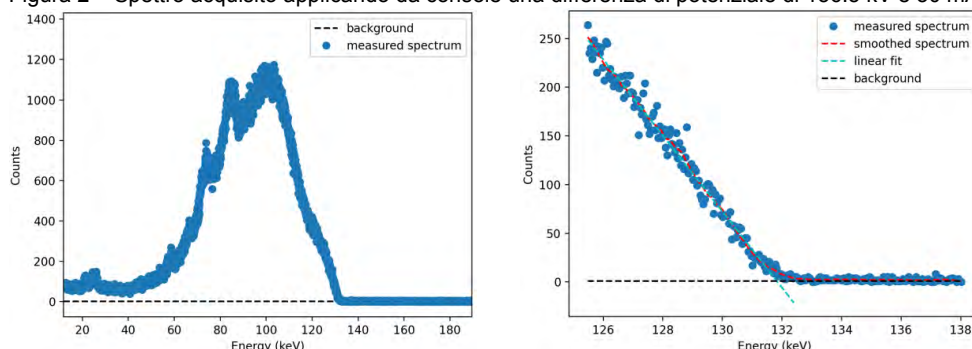
La figura mostra due spettri. Lo spettro a sinistra è lo spettro ottenuto per la qualità CCRI-135 ad una distanza di 1 m dal fuoco. Lo spettro di destra è ottenuto partendo dal precedente e aggiungendo 3 mm di Al e 3 mm di Cu.

È stata eseguita una taratura in energia dello spettrometro CdTe con sorgenti di Bario133 ed Europio152 realizzate dall'INMRI (settore radionuclidi) e mediante l'uso di una funzione di interpolazione lineare ricavati i parametri della retta di taratura.

Sono state eseguite misure di fondo nella stanza in cui è alloggiato il tubo al fine di tenerne conto durante la successiva analisi. Da queste misure è stato determinato un valore di fondo medio. Lo spettro di fondo è stato acquisito per un tempo della durata di 3 ore.

Gli spettri per eseguire questo studio sono stati acquisiti per un tempo di 5 minuti, questo tempo si è dimostrato sufficiente al fine di avere una buona statistica di conteggio. Il metodo utilizzato per la determinazione dell'endpoint dello spettro è stato implementato tramite un codice Python che esegue una procedura di "levigatura" dello spettro mediante il metodo di Savitzky-Golay al fine di ridurre le fluttuazioni statistiche dei conteggi. Successivamente si è eseguito un fit lineare sulla parte finale dello spettro già "levigato" e l'intersezione di questa retta con la retta di regressione del fondo fornisce una stima del valore di endpoint dello spettro (fig. 2).

Figura 2 – Spettro acquisito applicando da console una differenza di potenziale di 136.5 kV e 30 mA.



Lo spettro a sinistra è ottenuto impostando sulla console 136.5 kV e 30 mA con il filtro della qualità CCRI-135 più l'aggiunta di filtri. A destra è mostrata la parte finale dello spettro mostrato a sinistra su cui si applica la procedura per la stima dell'energia di endpoint.

RISULTATI

Nel 2016 furono effettuate misure spettrometriche con un rivelatore HPGe per la determinazione dell'energia di endpoint facendo ricorso ad un metodo diverso da quello proposto in questo studio. Come risultato di queste misure si osservò che per ottenere i valori nominali di tensione, V_{norm} , così come richiesto dalla vigente normativa era necessario compensare i valori di tensione erogati dal generatore, V_{gen} , in funzione dei valori della corrente anodica I_{anode} poiché era presente un fenomeno di caduta di potenziale collegato all'aumento della corrente che rendeva i due valori di tensione non coincidenti. Queste misure furono eseguite senza la disponibilità di partitori di tensione.

Partendo da questi risultati, in questo nuovo studio sono state effettuate nuove misure acquisendo gli spettri con un nuovo rivelatore al CdTe e registrando allo stesso tempo i valori di differenza di potenziale letti dai partitori di tensione, $V_{voltage\ divider}$.

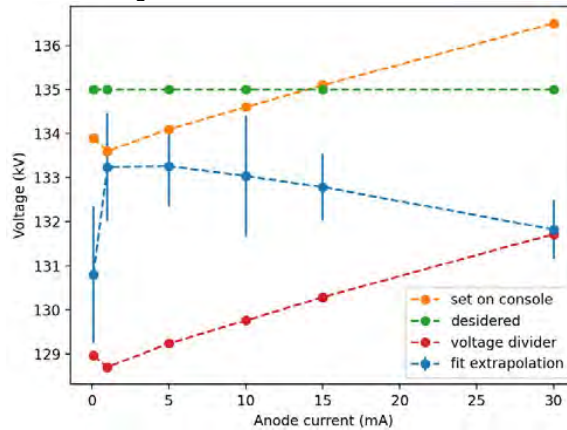
Nella tabella (tab. 1) la differenza di potenziale impostata sulla console è quella stimata dalla spettrometria del 2016.

Su questi spettri acquisiti si applica il metodo per la determinazione dell'endpoint, sopra descritto, e si stima poi la differenza di potenziale applicata tra anodo e catodo V_{tube} .

Tabella 1 – Valori di differenza di potenziale misurati al variare della corrente anodica.

V_{norm} CCRI-135 (kV)	I_{anode} (mA)	V_{gen} (kV)	$V_{voltage\ divider}$ (kV)	V_{tube} (kV)
135	0.1	133.9	128.96	130.8 ± 1.5
135	1	133.6	128.70	133.2 ± 1.2
135	5	134.1	129.24	133.3 ± 0.9
135	10	134.6	129.76	133.0 ± 1.4
135	15	135.1	130.29	132.8 ± 0.8
135	30	136.5	131.72	131.8 ± 0.7

Figura 3 – Risultati delle misure.



Risultati delle misure raccolti in tabella (tab. 1).

La figura (fig.3) mostra i risultati ottenuti, si può osservare come i valori di differenza di potenziale impostati sulla console V_{gen} e i valori misurati dai partitori di tensione $V_{voltage\ divider}$ hanno lo stesso andamento ma con una traslazione di circa 5 kV,

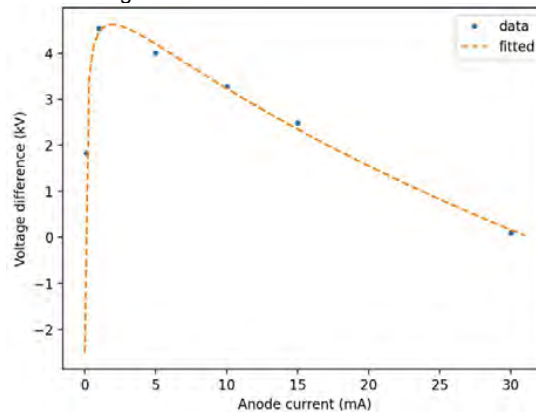
$$V_{gen} - V_{voltage\ divider} = (4.9 \pm 0.1) \text{ kV}$$

Graficando l'andamento della differenza $V_{tube} - V_{voltage\ divider}$ in funzione della corrente anodica I_{anode} e interpolando i dati con una funzione di fit $f(x)$ del tipo

$$f(x) = e \cdot \ln(x^a) - b \cdot x^c + d$$

dove a , b , c e d sono i parametri da trovare. Si ottengono così i risultati riportati in (fig.4) e (tab.2).

Figura 4 – Risultati delle misure.



Differenza $V_{tube} - V_{voltage\ divider}$ in funzione della corrente anodica I_{anode} e relativo fit.

Tabella 2 – Valori dei parametri di fit.

a	b (1/mA)	c	d (mA)
0.938	6.067	0.336	10.525

Essendo



$$V_{tube} - V_{voltage\ divider} = f(x)$$

si ricava la relazione che lega la differenza di potenziale impostata alla console con la differenza di potenziale letta dai partitori e quella che effettivamente si trova tra anodo e catodo V_{tube} in funzione della corrente anodica I_{anode}

$$V_{voltage\ divider} = V_{tube} - f(I_{anode})$$

Ricordando che $V_{gen} - V_{voltage\ divider} = (4.9 \pm 0.1) \text{ kV}$, si trova la relazione finale

$$V_{gen} = 4.9 \text{ kV} + V_{tube} - f(I_{anode})$$

Dai dati raccolti in (tab.1) si vede uno scarto di circa 2 keV tra i valori ottenuti dalle misure spettrometriche del 2016 e impostati sulla console V_{gen} e i valori stimati con il nuovo metodo V_{tube} , questa differenza risiede nel fatto che l'analisi fatta sugli spettri del 2016 è diversa da quella fatta sugli spettri attuali.

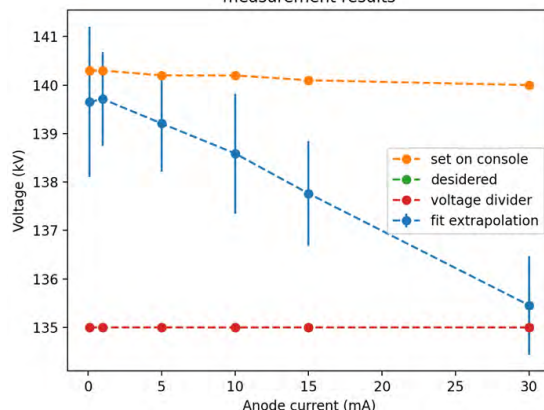
I valori stimati dal presente metodo sottostimano l'endpoint dello spettro però restano costanti intorno ad un valore di 133kV.

Ripetendo le misure, al fine di ottenere 135 kV, basandosi sulle letture dei partitori si impostano i seguenti valori di differenza di potenziale sulla console e si acquisiscono gli spettri e si ripete l'analisi, (tab. 3) e (fig.5).

Tabella 3 – Valori di differenza di potenziale misurati al variare della corrente anodica.

V_{norm} CCRI-135 (kV)	I_{anode} (mA)	V_{gen} (kV)	$V_{voltage\ divider}$ (kV)	V_{tube} (kV)
135	0.1	140.3	135	139.7 ± 1.5
135	1	140.3	135	139.7 ± 1.0
135	5	140.2	135	139.2 ± 1.0
135	10	140.2	135	138.6 ± 1.2
135	15	140.2	135	137.8 ± 1.1
135	30	140	135	135.5 ± 1.0

Figura 5 – Risultati delle misure.
measurement results



Risultati delle misure raccolti in tabella (tab. 3), i valori di differenza di potenziale desiderati (V_{norm}) e quelli letti dai partitori ($V_{voltage\ divider}$) sono sovrapposti.

Resta da verificare, mediante misure con un oscilloscopio, se il ripple del generatore influenza o meno l'alta tensione e in caso di risposta positiva bisogna tenerne conto. Queste misure sono in corso e al momento non ci sono ancora dei risultati.

CONCLUSIONI

Dallo studio eseguito si ricava che la differenza di potenziale applicata tra anodo e catodo V_{tube} del tubo radiogeno non è fissa ma presenta una dipendenza dalla corrente anodica I_{anode} . Lo studio mostra anche una differenza tra la differenza di potenziale applicata alla console V_{gen} , quella letta dai partitori di tensione $V_{voltage\ divider}$ e quella risultante tra anodo e catodo V_{tube} , come è stato possibile evincere utilizzando un sistema per spettrometria tarato in energia.

Difatti, dalle misure spettrometriche è possibile ricavare l'endpoint energy degli spettri da cui si ricava la differenza di potenziale V_{tube} . Con una procedura di regressione si stimano i parametri della funzione e si può così collegare la differenza di potenziale che si vuole avere tra anodo e catodo del tubo radiogeno alla differenza di potenziale da impostare sulla console.

Queste differenze sono imputabili ad un circuito di protezione del tubo, questo non è schematizzabile come una semplice resistenza in quanto la caratteristica corrente-tensione ha un andamento non lineare.

Per laboratori che fanno uso di un tubo radiogeno con un circuito di protezione l'uso dei partitori di tensione non è sufficiente a garantire il valore effettivo della differenza di potenziale applicata tra anodo e catodo, al contrario di quanto la norma ISO 4037 suggerisce.

Ulteriori studi sull'argomento sono necessari per chiarire meglio l'impatto di questo circuito protettivo, quando esso sia presente, sulla differenza di potenziale effettivamente applicata tra l'anodo e il catodo del tubo radiogeno. Bisogna anche studiare il ripple dell'alta tensione e se questo influenza o meno l'endpoint dello spettro ed eventualmente tenerne conto.

Bibliografia

[ISO, 2019] ISO 4037-1:2019, Radiological protection – X and gamma reference radiation for calibrating dosimeter and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy. Part 1. Radiation characteristics and production methods, second edition, ISO, Geneve, Switzerland (2019).

[CCEMRI, 1972] Qualités de rayonnement Comité Consultatif pour les Étalons de Mesures des Rayonnements Ionisants (Section1) 2nd meeting R15-16.