

*G. D'Agostino<sup>(1)</sup>, V. De Coste<sup>(2)</sup>, D. Dondi<sup>(3)</sup>,  
S. Lazzaroni<sup>(1)</sup>, M. Pimpinella<sup>(2)</sup>*

**Misura della dose assorbita in acqua di una sorgente di radiazioni  
gamma del <sup>60</sup>Co installata presso il Laboratorio Energia Nucleare  
Applicata dell'Università di Pavia**

T.R. 7/2016

Febbraio 2016

I.N.RI.M. TECHNICAL REPORT

(1) Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM), Pavia

(2) Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti (ENEA-INMRI), C. R. Casaccia, Roma

(3) Dipartimento di Chimica, Università di Pavia

**Abstract:** The activities aimed at the calibration of a Fricke dosimetric system in terms of absorbed dose in water compared to the ENEA national standard and its use for the determination of the dose rate in water of the  $^{60}\text{Co}$  gamma source installed at the Laboratorio Energia Nucleare Applicata of the University of Pavia are described. The dose rate measured the 16<sup>th</sup>, October 2015 is  $R = (0.03908 \pm 0.00084) \text{ Gy s}^{-1}$ ; uncertainty with a coverage factor  $k = 2$ .

**Estratto:** Si descrivono le attività finalizzate alla taratura di un sistema dosimetrico a soluzione acquosa di solfato ferroso in termini di dose assorbita in acqua per confronto con il corrispondente campione nazionale dell'ENEA e il suo utilizzo per la caratterizzazione in termini di rateo di dose assorbita in acqua della sorgente di radiazioni gamma del  $^{60}\text{Co}$  installata presso il Laboratorio Energia Nucleare Applicata dell'Università degli Studi di Pavia. Il rateo di dose,  $R$ , misurato il 16/10/2015, è pari a  $(0.03908 \pm 0.00084) \text{ Gy s}^{-1}$ ; incertezza con fattore di copertura  $k = 2$ .

## Indice

1.	Introduzione.....	3
2.	Attività sperimentale.....	4
	2.1 Irraggiamento dei dosimetri Fricke nel fascio di radiazione gamma di riferimento dell'ENEA e nel fascio di $^{60}\text{Co}$ della sorgente LENA e letture di assorbanza.....	4
	2.2 Analisi dei dati sperimentali e valutazione dell'incertezza di misura .....	8
3.	Conclusioni .....	14
	Riferimenti	

## 1. Introduzione

L'attività oggetto del presente rapporto tecnico si è svolta nell'ambito del progetto PRIN 2010-2011 "Sviluppo e applicazione di nuovi materiali dosimetrici per radiazioni ionizzanti" (prot. 2010SNALEM\_005) e fa riferimento al contratto di servizio tecnico-scientifico stipulato tra l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM) e l'Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (ENEA). Responsabili del contratto sono: per l'INRIM l'Ing. Giancarlo D'Agostino e per l'ENEA la Dott.ssa Maria Pimpinella.

Come riportato nell'introduzione del Rapporto Tecnico INRIM T.R. 6/2016 del Febbraio 2016 (denominato qui di seguito RT I), l'attività riguarda la taratura di un sistema dosimetrico a soluzione acquosa di solfato ferroso in termini di dose assorbita in acqua per confronto con il corrispondente campione nazionale dell'ENEA e il suo utilizzo per la caratterizzazione in termini di rateo di dose assorbita in acqua della sorgente di radiazioni gamma del  $^{60}\text{Co}$  (denominata qui di seguito "sorgente LENA") installata presso il Laboratorio Energia Nucleare Applicata dell'Università degli Studi di Pavia.

I risultati preliminari descritti nel sopracitato RTI sono stati ottenuti con il sistema dosimetrico a soluzione acquosa di solfato ferroso utilizzato come dosimetro Fricke con l'ausilio di dati di letteratura relativi al coefficiente di assorbimento molare lineare,  $\varepsilon$ , e alla resa radiolitica,  $G$ , dello ione  $\text{Fe}^{3+}$ . Al 26/03/2015 e nelle specifiche condizioni di irraggiamento (vedere figura 1 del RT I) è stato stimato un rateo di dose pari a  $R_{\text{LENA I}} = 0.03995 \text{ Gy s}^{-1}$  con una incertezza tipo di categoria A di  $0.00010 \text{ Gy s}^{-1}$ . Il valore del rateo di dose sebbene mancante di riferibilità al campione nazionale è utile per stabilire i tempi di irraggiamento per le misurazioni da effettuare per la caratterizzazione finale della sorgente LENA, descritta nel presente rapporto.

Per la taratura del sistema dosimetrico, dosimetri a soluzione acquosa di solfato ferroso sono stati irraggiati a valori di dose noti (riferiti al campione nazionale) di 40 Gy, 50 Gy, 60 Gy e 70 Gy nel fascio di radiazione gamma di riferimento del  $^{60}\text{Co}$  (sorgente denominata qui di seguito "sorgente ENEA") disponibile presso l'Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti dell'ENEA. Il campione nazionale di dose assorbita in acqua è costituito da un calorimetro in grafite e un sistema di trasferimento ionimetrico della dose assorbita in grafite in dose assorbita in acqua [1]. Il valore di riferimento della dose assorbita in acqua alla data 01/01/2015 è di  $0.2122 \text{ Gy min}^{-1}$  con un'incertezza tipo composta relativa,  $u_{\text{r ENEA}}$ , dello 0.4% (Confronto chiave BIPM-RI(I)-K4, [2, 3]). Il valore di riferimento è stabilito alla profondità di  $5 \text{ g cm}^{-2}$  in acqua con campo di radiazione  $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$  e una distanza dalla sorgente di 100 cm. Per gli irraggiamenti oggetto di questo rapporto la distanza dalla sorgente è stata ridotta in modo da minimizzare i tempi di irraggiamento pur assicurando una buona uniformità del campo di radiazione sui dosimetri. Il valore di rateo di dose assorbita nelle condizioni di irraggiamento dei dosimetri è stato misurato con una camera a ionizzazione del tipo Farmer NE 2571 precedentemente tarata per confronto con il campione primario. Il rateo di dose per gli irraggiamenti dei dosimetri a solfato ferroso,  $R_{\text{ENEA}}$ , al 15/10/2015 è stimato di  $0.3156 \text{ Gy min}^{-1}$  con un'incertezza tipo composta relativa,  $u_{\text{r ENEA}}$ , dello 0.9%. Tale incertezza include le componenti di incertezza dovute alla uniformità del campo, alla realizzazione delle condizioni di misura e al posizionamento dei dosimetri chimici.

Per la caratterizzazione della sorgente LENA è stata utilizzata la stessa soluzione dosimetrica utilizzata per la taratura del sistema dosimetrico. Sulla base del valore di  $R_{\text{LENA I}}$ , sono stati determinati i tempi di irraggiamento corrispondenti a valori di dose assorbita approssimativamente di 40 Gy, 50 Gy, 60 Gy e 70 Gy (cioè lo stesso intervallo di valori utilizzato per la taratura).

Nei paragrafi seguenti si descrive l'attività sperimentale e si riportano i risultati ottenuti dall'analisi dei dati acquisiti. Le incertezze sono dichiarate con fattore di copertura  $k = 1$  salvo diversamente specificato.

## 2. Attività sperimentale

### 2.1 Irraggiamento dei dosimetri Fricke nel fascio di radiazione gamma di riferimento dell'ENEA e nel fascio di $^{60}\text{Co}$ della sorgente LENA e letture di assorbanza

L'obiettivo dell'attività è la taratura di un sistema dosimetrico Fricke per la misura del rateo di dose assorbita in acqua della sorgente LENA con riferibilità al corrispondente campione nazionale. Le specifiche tecniche della sorgente LENA e le caratteristiche dell'installazione sono descritte nel paragrafo 2 del RT I.

Per l'attività sperimentale, il 07/10/2015 è stato preparato 1 L di soluzione (Fricke) secondo la ricetta descritta in [4]. I dettagli relativi alla purezza dei componenti e al protocollo di pulizia sono riportati nel paragrafo 2 del RT I.

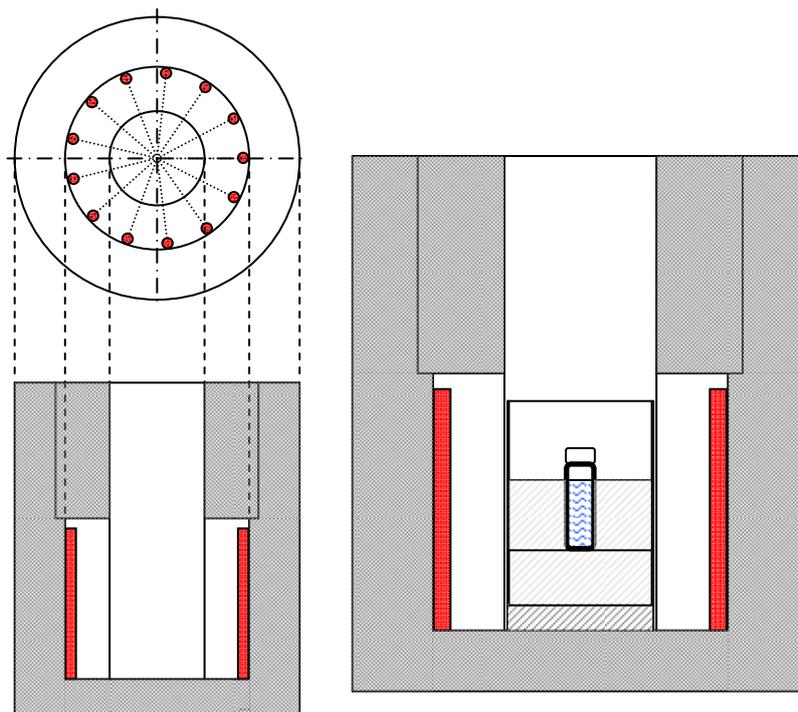
Per l'irraggiamento sono state utilizzate fiale in pirex da 10 mL condizionate il 09/10/2015 mediante pre-irraggiamento a circa 500 Gy (paragrafo 2 del RT I). Lo stesso giorno sono state riempite con la soluzione dosimetrica 22 fiale di cui 11 previste per l'irraggiamento con la sorgente LENA e 11 per l'irraggiamento con la sorgente ENEA.

Il 16/10/2015, delle 11 fiale LENA, 2 fiale sono state irraggiate con un tempo di esposizione di 1003 s (nome soluzioni "1" e "2"), 2 con un tempo di esposizione di 1253 s (nome soluzioni "3" e "4"), 2 con un tempo di esposizione di 1504 s (nome soluzioni "5" e "6"), 2 con un tempo di esposizione di 1755 s (nome soluzioni "7" e "8") e 3 non sono state irraggiate (nome soluzioni "9", "10" e "11"). La temperatura della soluzione durante l'irraggiamento,  $T_{\text{irr}}$ , è stata valutata di 21.6 °C inserendo una termocoppia in un contenitore riempito con acqua dopo una notte di permanenza nella cella. La temperatura ambiente, dove sono state tenute le fiale, è stata di 21.1 °C.

La singola fiala è stata collocata all'interno della sorgente come indicato in figura 1. A differenza dell'irraggiamento effettuato per la prima determinazione del rateo  $R_{\text{LENA I}}$  (rapporto RT I), la fiala è stata posizionata su un cilindro in plexiglass di 4 cm di altezza in modo tale che il centro di massa della soluzione corrisponda al centro di massa delle barre di  $^{60}\text{Co}$ . Si assume che la dose assorbita dal dosimetro durante la movimentazione della fiala per il suo posizionamento all'interno della sorgente (transiente OFF/ON e ON/OFF dell'irraggiamento) sia trascurabile. Pertanto, il tempo di esposizione, nel seguito indicato  $t_{\text{irr}}$ , è il tempo in cui la fiala resta nella posizione indicata in figura 1 ovvero il tempo di irraggiamento con rateo di dose costante.

Il 12/10/2015, le 11 fiale ENEA sono state spedite via corriere a Roma presso l'Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti dell'ENEA; la consegna è stata effettuata il 13/10/2015.

Delle 11 fiale ENEA, 2 sono state irraggiate il 15/10/2015 (nome soluzioni "1E" e "2E") con una dose di 40 Gy, 1 è stata irraggiata il 16/10/2015 (nome soluzione "3E") con una dose di 50 Gy, 2 sono state irraggiate il 19/10/2015 (nome soluzioni "4E" e "5E") con una dose di 50 Gy e 60 Gy, rispettivamente, 2 sono state irraggiate il 20/10/2015 (nome soluzioni "6E" e "7E") con una dose di 60 Gy e 70 Gy, rispettivamente, 1 è stata irraggiata il 21/10/2015 (nome soluzione "8E") con una dose di 70 Gy e 3 non sono state irraggiate (nome soluzioni "9E", "10E" e "11E") perché utilizzate come dosimetri "testimoni" per la valutazione dell'assorbanza della soluzione non irraggiata .



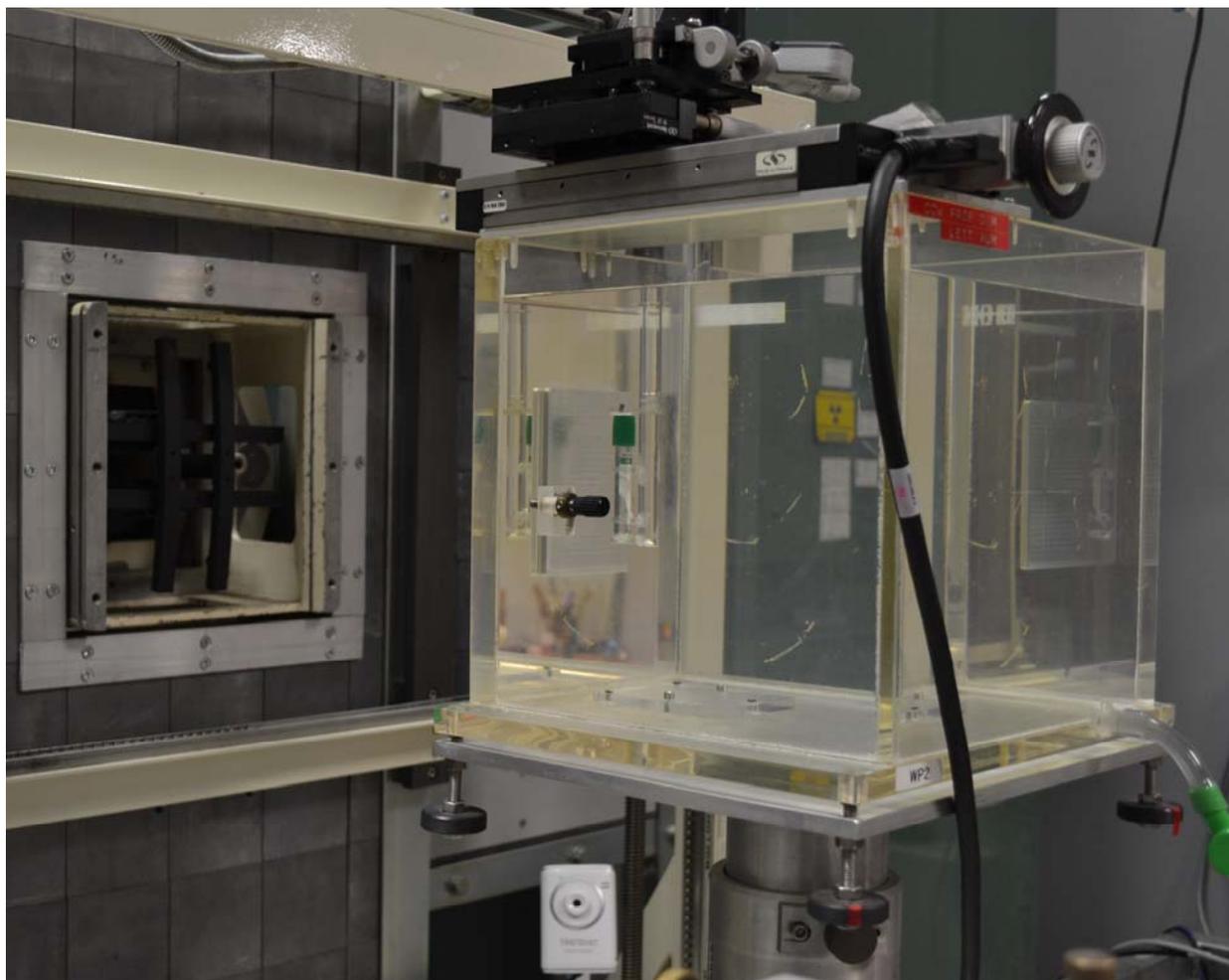
**Figura 1.** Sorgente LENA e posizionamento della fiala (in rosso le barre di Co)

Le fiale sono state irradiate in successione alla profondità di  $5 \text{ g cm}^{-2}$  in acqua utilizzando la sorgente ENEA (Figura 2). La distanza sorgente-superficie del fantoccio ad acqua è stata  $77 \text{ cm}$  e il campo di radiazione alla superficie del fantoccio  $7 \text{ cm} \times 7 \text{ cm}$ . La temperatura dell'acqua durante l'irraggiamento è stata monitorata con termometro a quarzo tipo HP 2804 e sonda HP 18111. Per ogni dosimetro è stata quindi valutata la temperatura media durante l'irraggiamento,  $T_{\text{irr}}$ , i cui valori sono risultati tra  $21^\circ\text{C}$  e  $21.8^\circ\text{C}$ . L'incertezza tipo di  $T_{\text{irr}}$  è stimata  $0.3^\circ\text{C}$ . Il rateo di dose utilizzato per la determinazione dei valori di dose impartita ai dosimetri (fiale) è stato  $R_{\text{ENEA}} = 0.3156(28) \text{ Gy min}^{-1}$  al 15/10/2015.

Il 22/10/2015, le 11 fiale ENEA sono state spedite a Pavia via corriere; la consegna è stata effettuata il 23/10/2015.

Gli spettri UV-vis delle soluzioni contenute nelle 22 fiale e della soluzione non irradiata conservata nel matraccio usato per la preparazione (nome soluzione "S") sono stati registrati presso il laboratorio INRIM di Pavia il 26/10/2015 con uno spettrofotometro a singolo fascio (Helwett Packard, modello 8452A, a diodo, lunghezza d'onda da  $190 \text{ nm}$  a  $820 \text{ nm}$ , risoluzione  $2 \text{ nm}$ ). È stata utilizzata una cuvetta in quarzo con una lunghezza di cammino ottico di  $10 \text{ mm}$ .

Lo spettrometro è stato acceso circa  $2 \text{ h}$  prima dell'inizio delle acquisizioni; le fiale sono state conservate al riparo dalla luce e da fonti di calore nel laboratorio. La temperatura media della soluzione durante l'acquisizione degli spettri,  $T_{\text{mis}}$ ,  $25.0^\circ\text{C}$  con semicampo di variabilità di  $2.5^\circ\text{C}$ , è stata valutata sulla base di misure effettuate con una termocoppia inserita nella cuvetta di quarzo al termine delle misurazioni (durata della sessione di misura di circa  $4 \text{ h}$ ).



**Figura 2.** Apparato sperimentale per l'irraggiamento dei dosimetri Fricke in fantoccio di acqua nel fascio di radiazione gamma di riferimento della sorgente ENEA .

La sequenza delle misure spettrofotometriche è indicata nelle tabelle 1, 2 e 3. Si riporta la lettura di assorbanza per unità di cammino ottico,  $A$ , (per brevità definita assorbanza) in funzione della soluzione misurata. Qui e nel resto del testo i valori di  $A$  sono quelli misurati alla lunghezza d'onda 304 nm (vedi RTI).

Nelle tabelle ogni lettura è identificata con un numero progressivo (prima colonna) e un codice del tipo “*nome\_spettro; numero\_d'ordine\_lettura*” (seconda colonna). Il nome spettro “UV CU” è riferito allo spettro registrato con la cuvetta vuota; il nome spettro “UV H<sub>2</sub>O” è riferito allo spettro registrato per l'acqua ultrapura, il nome spettro “UV 0” è riferito allo spettro registrato per la soluzione non irraggiata e il nome spettro “UV  $x$ ” è riferito allo spettro registrato per la soluzione irraggiata con dose nominale “ $x$ ”. Per ogni tipologia di spettro (identificata dal *nome\_spettro*) viene riportato il proprio *numero\_d'ordine\_lettura*, seguito dalla lettera  $E$  per le acquisizioni riguardanti la sorgente ENEA (tabella 2) e dalla lettera  $S$  per le acquisizioni riguardanti la soluzione non irraggiata prelevata dal matraccio (tabella 3). Come esempio la sigla  $UV\ 70\ 3E$  indica la terza acquisizione di spettro con soluzione irraggiata a 70 Gy con la sorgente ENEA. La terza colonna riporta il nome soluzione come specificato nel testo.

Gli spettri sono stati acquisiti riempiendo la cuvetta con 3 mL di soluzione. In caso di cambio di liquido di misura, la cuvetta è stata condizionata con circa 1 mL di nuovo liquido (acqua ultrapura o soluzione). Come bianco è stato utilizzato lo spettro registrato con la sola cuvetta. Come stabilito in

RTI, sono stati registrati 15 spettri relativi all'acqua ultrapura per monitorare eventuali variazioni sistematiche durante l'esecuzione delle misure.

n.	Spettro	soluzione	A (304 nm) / cm <sup>-1</sup>	A <sub>c</sub> (304 nm) / cm <sup>-1</sup>
-	UV CU 1	-	0.00008	-
0	UV H <sub>2</sub> O 1	-	-0.04971	-0.0497
1	UV 0 1	9	0.08258	0.0824
2	UV 0 2	9	0.08304	0.0827
3	UV 0 3	10	0.08180	0.0813
4	UV H <sub>2</sub> O 2	-	-0.04881	-0.0495
5	UV 40 1	1	0.21674	0.2159
6	UV 40 2	1	0.21893	0.2179
7	UV 40 3	-	0.21611	0.2149
8	UV 40 4	2	0.21855	0.2171
9	UV H <sub>2</sub> O 3	2	-0.04904	-0.0506
10	UV 50 1	3	0.25146	0.2497
11	UV 50 2	3	0.25522	0.2533
12	UV 50 3	4	0.25127	0.2492
13	UV 50 4	4	0.25415	0.2519
14	UV H <sub>2</sub> O 4	-	-0.04675	-0.0492
15	UV 60 1	5	0.28947	0.2868
16	UV 60 2	5	0.29027	0.2875
17	UV 60 3	6	0.28601	0.2830
18	UV 60 4	6	0.28784	0.2847
19	UV H <sub>2</sub> O 5	-	-0.04617	-0.0495
20	UV 70 1	7	0.32101	0.3175
21	UV 70 2	7	0.32486	0.3212
22	UV 70 3	8	0.32240	0.3185
23	UV 70 4	8	0.32423	0.3202
24	UV H <sub>2</sub> O 6	-	-0.04521	-0.0494
25	UV 0 4	10	0.08755	0.0832
26	UV 0 5	11	0.08626	0.0817
27	UV 0 6	11	0.08676	0.0820
28	UV H <sub>2</sub> O 7	-	-0.04527	-0.0502

**Tabella 1.** Misure UV-vis delle fiale LENA

n.	Spettro	soluzione	A (304 nm) / cm <sup>-1</sup>	A <sub>c</sub> (304 nm) / cm <sup>-1</sup>
29	UV H <sub>2</sub> O 1E	-	-0.04463	-0.0497
30	UV 0 1E	9E	0.09041	0.0851
31	UV 0 2E	9E	0.09094	0.0855
32	UV 0 3E	10E	0.08925	0.0836
33	UV H <sub>2</sub> O 2E	-	-0.04269	-0.0485
34	UV 40 1E	1E	0.22720	0.2212
35	UV 40 2E	1E	0.22771	0.2216
36	UV 40 3E	2E	0.22859	0.2223
37	UV 40 4E	2E	0.22974	0.2232
38	UV H <sub>2</sub> O 3E	-	-0.04291	-0.0496
39	UV 50 1E	3E	0.25974	0.2529

40	UV 50 2E	3E	0.26291	0.2559
41	UV 50 3E	4E	0.26332	0.2561
42	UV 50 4E	4E	0.26578	0.2584
43	UV H <sub>2</sub> O 4E	-	-0.04248	-0.0500
44	UV 60 1E	5E	0.27913	0.2922
45	UV 60 2E	5E	0.28030	0.2932
46	UV 60 3E	6E	0.27673	0.2895
47	UV 60 4E	6E	0.27916	0.2917
48	UV H <sub>2</sub> O 5E	-	-0.06105	-0.0487
49	UV 70 1E	7E	0.31506	0.3273
50	UV 70 2E	7E	0.31920	0.3312
51	UV 70 3E	8E	0.31509	0.3269
52	UV 70 4E	8E	0.31696	0.3286
53	UV H <sub>2</sub> O 6E	-	-0.06137	-0.0499
54	UV 0 4E	10E	0.07280	0.0841
55	UV 0 5E	11E	0.07375	0.0849
56	UV 0 6E	11E	0.07387	0.0848
57	UV H <sub>2</sub> O 7E	-	-0.06042	-0.0496

**Tabella 2.** Misure UV-vis delle fiale ENEA

n.	Spettro	soluzione	A (304 nm) / cm <sup>-1</sup>	A <sub>c</sub> (304 nm) / cm <sup>-1</sup>
58	UV 0 1S	S	0.07053	0.0811
59	UV 0 2S	S	0.07158	0.0820
60	UV 0 3S	S	0.07249	0.0828
61	UV H <sub>2</sub> O 8	-	-0.06044	-0.0504

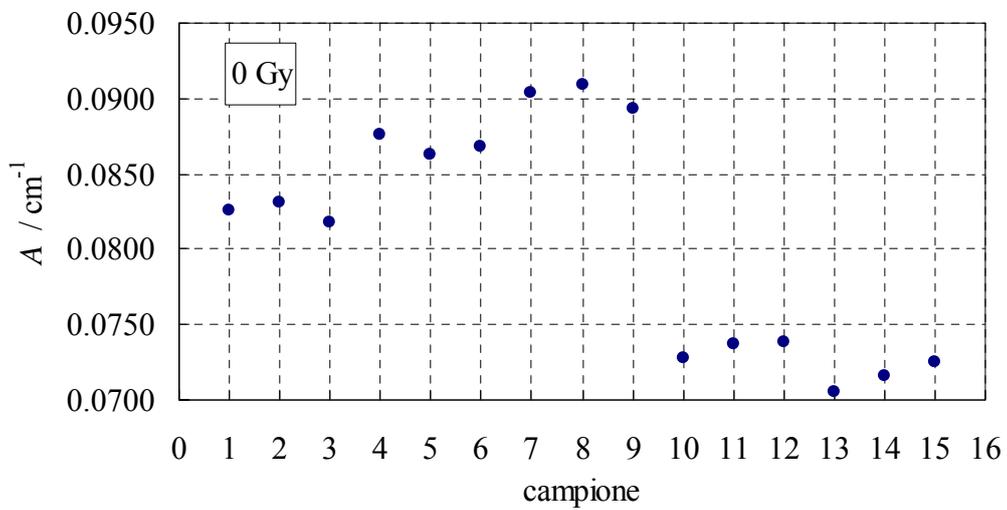
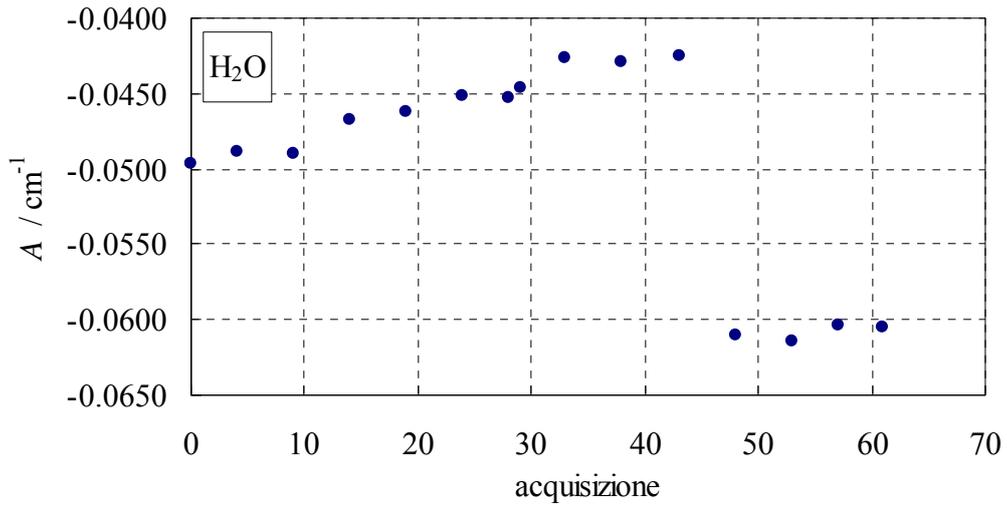
**Tabella 3.** Misure UV-vis della soluzione Fricke conservata nel matraccio usato per la preparazione

## 2.2 Analisi dei dati sperimentali e valutazione dell'incertezza di misura

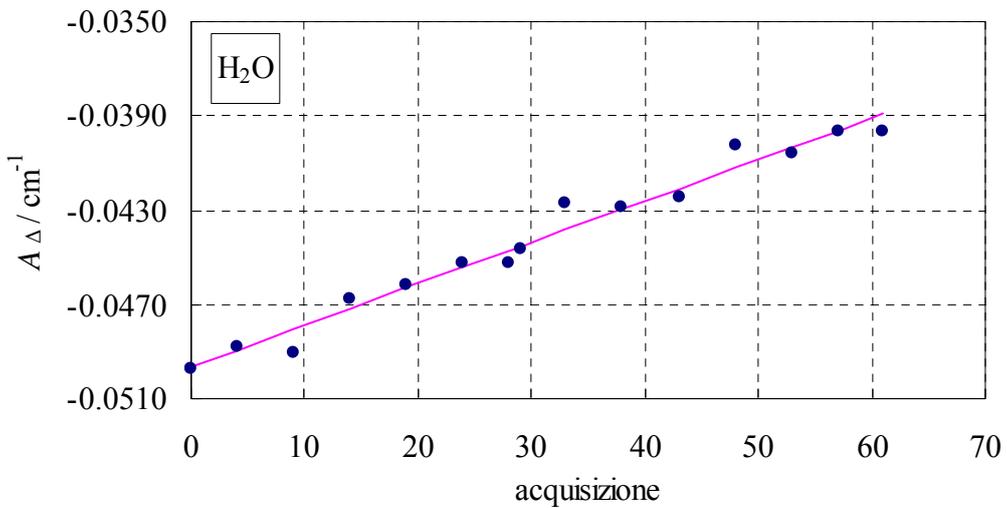
In figura 3 il grafico superiore mostra i valori di  $A$  registrati con l'acqua ultrapura (acquisizioni n. 0, 4, 9, 14, 19, 24, 28, 29, 33, 38, 43, 48, 53, 57 e 61) mentre il grafico inferiore mostra i valori di  $A$  registrati con le soluzioni non irraggiate (campioni 1, 2, 3, 4, 5, e 6 relativi agli spettri n. 1, 2, 3, 25, 26, e 27 fiale LENA, campioni 7, 8, 9, 10, 11 e 12 relativi agli spettri n. 30, 31, 32, 54, 55 e 56 fiale ENEA, campioni 13, 14 e 15 relativi spettri n. 58, 59 e 60 soluzione non irraggiata in matraccio di preparazione).

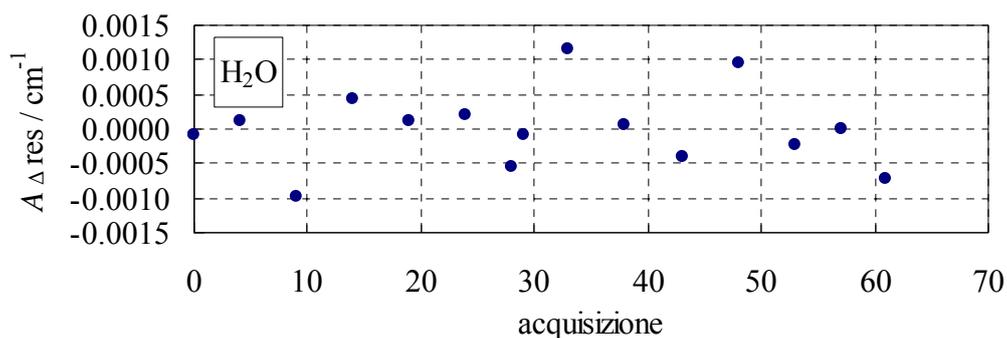
In entrambi i grafici si osserva una deriva,  $\alpha_d$ , e un offset,  $\Delta$ , di misura registrato tra l'acquisizione 43 e 48. E' stato valutato un valore di  $\Delta$  pari a  $-0.0208 \text{ cm}^{-1}$  usando i dati ottenuti con l'acqua ultrapura. In particolare è stata applicata una correzione  $-\Delta$  alle assorbanze delle acquisizioni 48, 53, 57 e 61 che minimizza i residui ottenuti fittando i dati con una retta. Il valore di  $\alpha_d$  è risultato di  $0.000176(8) \text{ cm}^{-1}$  per acquisizione.

La retta di fit e i residui ottenuti sono rappresentati nella figura 4. Lo scarto tipo dei residui è di  $0.0006 \text{ cm}^{-1}$ .



**Figura 3.** Variazioni di assorbanza relative alle misure effettuate con l'acqua ultrapura (grafico superiore) e con le soluzioni di Fricke non irraggiate (grafico inferiore)





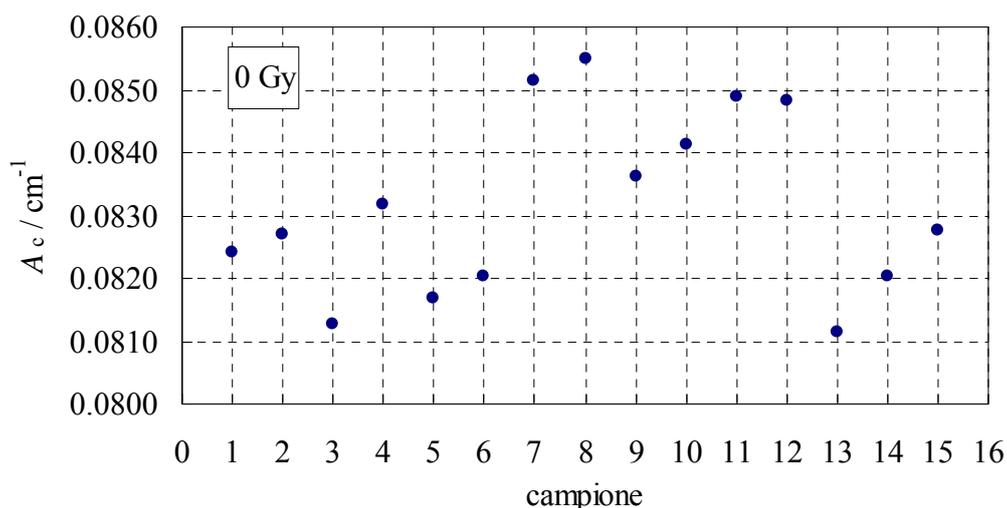
**Figura 4.** Fit dei dati ottenuti con l'acqua ultrapura dopo aver corretto l'offset  $\Delta$

L'analisi dei dati sperimentali riportati in tabella 2 ha evidenziato che l'offset è stato registrato tra l'acquisizione n. 43 e n. 44. I valori di assorbanza misurate sono stati quindi corretti sulla base di  $\alpha_d$  e  $\Delta$ . I risultati corretti,  $A_c$ , sono riportati nelle tabelle 1, 2 e 3 (quinta colonna).

Nella figura 5 sono riportati i valori corretti di assorbanza relative alle soluzioni non irradiate.

Per brevità nel resto del testo intenderemo i valori di assorbanza già corretti ed ometteremo il pedice c di  $A_c$ .

Il valore medio di  $A$  dell'acqua è di  $-0.0496 \text{ cm}^{-1}$ ; il valore medio di  $A$  della soluzione non irradiata LENA è di  $0.0822 \text{ cm}^{-1}$ ; il valore medio di  $A$  della soluzione non irradiata ENEA (dosimetri "testimoni") è di  $0.0847 \text{ cm}^{-1}$ ; il valore medio di  $A$  della soluzione non irradiata conservata nel matraccio di preparazione è di  $0.0820 \text{ cm}^{-1}$ . Si osserva che il trasporto e la conservazione della soluzione presso i laboratori ENEA hanno aumentato l'assorbanza di  $0.0025 \text{ cm}^{-1}$  mentre la conservazione della soluzione nelle fiale di irraggiamento non ha sostanzialmente variato l'assorbanza.



**Figura 5.** Variazioni di assorbanza corrette relative alle soluzioni di Fricke non irradiate

I valori di assorbanza registrati sono stati usati per calcolare l'assorbanza netta (valore di  $A$  della soluzione irradiata meno il valore medio di  $A$  misurato con la soluzione non irradiata), riferita alla temperatura  $T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  mediante la seguente formula:

$$\Delta A_{25} = \frac{\Delta A}{[1 + \alpha_{\varepsilon} (T_{\text{mis}} - T_0)][1 + \alpha_G (T_{\text{irr}} - T_0)]}, \quad (1)$$

dove  $\alpha_{\varepsilon} = 0.0069 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  è il coefficiente di correzione del coefficiente di assorbimento molare lineare del  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\alpha_G = 0.0015 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  è il coefficiente di correzione della resa radiolitica del  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $T_{\text{mis}}$  è la temperatura della soluzione durante l'acquisizione dello spettro UV-vis e  $T_{\text{irr}}$  è la temperatura della soluzione durante l'irraggiamento [4].

Per brevità nel resto del testo intenderemo i valori netti di assorbanza riferiti a  $T_0$  ed ometteremo il pedice 25 di  $\Delta A_{25}$ .

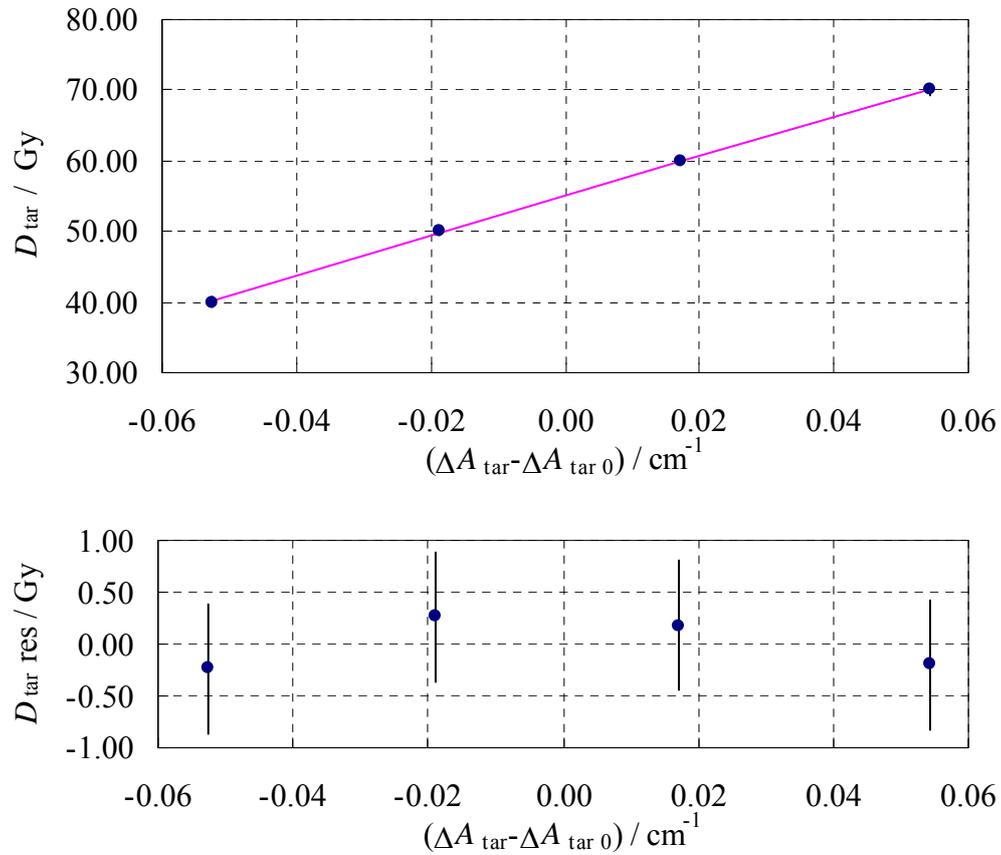
Sulla base dei dati sperimentali registrati si riportano in tabella 4 i valori netti di assorbanza delle soluzioni contenute nelle fiale ENEA,  $\Delta A_{\text{tar}}$ , calcolati con l'equazione 1 e le dosi di taratura,  $D_{\text{tar}}$ , a cui sono state sottoposte.

Soluzione	$\Delta A_{\text{tar}} / \text{cm}^{-1}$	$D_{\text{tar}} / \text{Gy}$
1E	0.1373	40.00
1E	0.1376	40.00
2E	0.1383	40.00
2E	0.1393	40.00
3E	0.1691	50.00
3E	0.1721	50.00
4E	0.1723	50.00
4E	0.1746	50.00
5E	0.2086	60.00
5E	0.2096	60.00
6E	0.2058	60.00
6E	0.2081	60.00
7E	0.2438	70.00
7E	0.2478	70.00
8E	0.2435	70.00
8E	0.2452	70.00

**Tabella 4.** Assorbanza netta rispetto alla dose ENEA

I valori medi di  $\Delta A_{\text{tar}}$  registrate alle dosi di taratura 40.00 Gy, 50.00 Gy, 60.00 Gy e 70.00 Gy sono  $0.1381 \text{ cm}^{-1}$ ,  $0.1720 \text{ cm}^{-1}$ ,  $0.2080 \text{ cm}^{-1}$  e  $0.2451 \text{ cm}^{-1}$ , rispettivamente; le differenze dei valori medi rispetto alla media dei 4 valori,  $\Delta A_{\text{tar}0} = 0.1908 \text{ cm}^{-1}$ , sono  $-0.0527 \text{ cm}^{-1}$ ,  $-0.0188 \text{ cm}^{-1}$ ,  $0.0172 \text{ cm}^{-1}$  e  $0.0543 \text{ cm}^{-1}$ , rispettivamente.

Le dosi di taratura rispetto alle differenze di assorbanza ( $\Delta A_{\text{tar}} - \Delta A_{\text{tar}0}$ ) sono riportate in figura 6 insieme ai residui ottenuti fittando i dati con una retta. Le barre d'errore rappresentano l'incertezza estesa ( $k = 2$ ) della stima della dose di taratura, 0.6 Gy. Il coefficiente angolare della retta ovvero coefficiente di taratura del sistema dosimetrico,  $\alpha_{\text{tar}}$ , è di  $28.00(39) \times 10 \text{ Gy cm}$  e la dose di taratura,  $D_{\text{tar}0}$ , corrispondente a  $\Delta A_{\text{tar}0}$ , è di  $55.00(16) \text{ Gy}$ .



**Figura 6.** Fit delle dosi di taratura rispetto alle differenze di assorbanza netta misurate

Sulla base dei dati sperimentali registrati si riportano in tabella 5 i valori netti di assorbanza delle soluzioni contenute nelle fiale LENA,  $\Delta A_{mis}$ , calcolati con l'equazione 1, e i tempi di irraggiamento,  $t_{irr}$ , a cui sono state sottoposte.

Le dosi misurate durante l'irraggiamento presso LENA sono calcolate mediante la seguente formula:

$$D_{mis} = (\Delta A_{mis} - \Delta A_{tar0}) \alpha_{tar} + D_{tar0}. \quad (2)$$

I risultati sono riportati nella tabella 5.

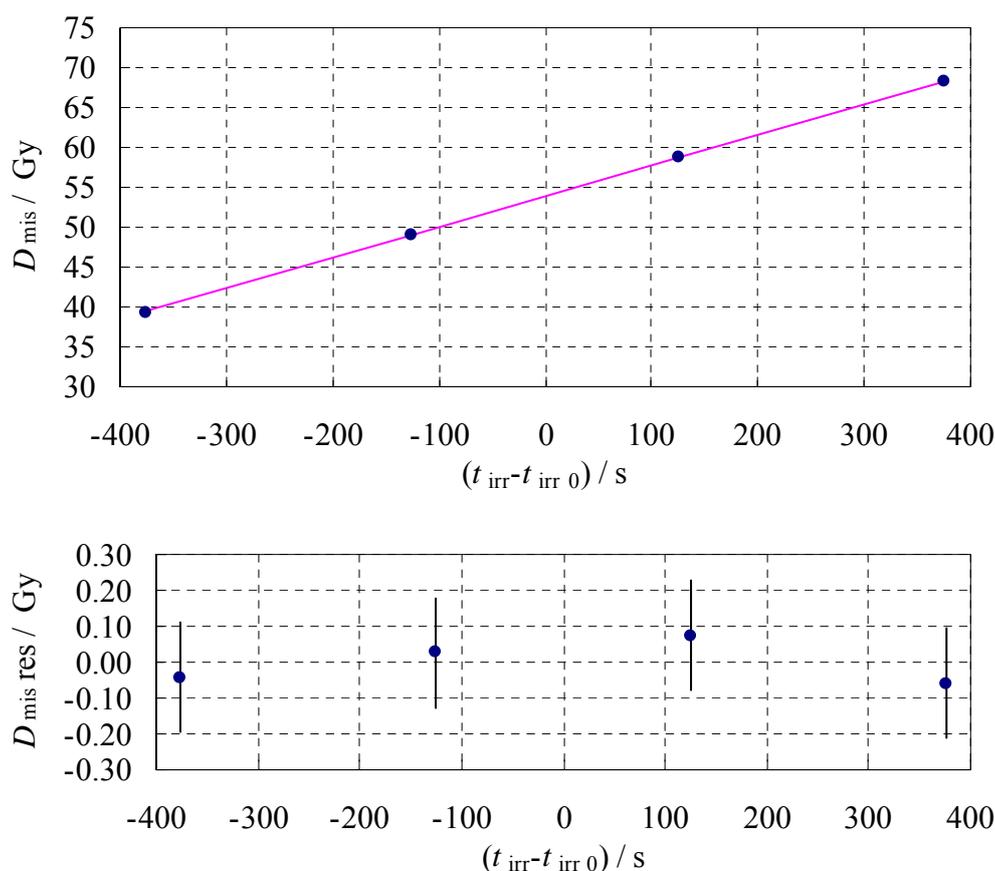
Soluzione	$\Delta A_{mis} / \text{cm}^{-1}$	$t_{irr} / \text{s}$	$D_{mis} / \text{Gy}$
1	0.1343	1003	39.18
1	0.1364	1003	39.75
2	0.1334	1003	38.91
2	0.1356	1003	39.55
3	0.1684	1253	48.71
3	0.1720	1253	49.72
4	0.1678	1253	48.56
4	0.1705	1253	49.32
5	0.2057	1504	59.16

5	0.2063	1504	59.34
6	0.2018	1504	58.09
6	0.2035	1504	58.56
7	0.2365	1755	67.79
7	0.2402	1755	68.83
8	0.2375	1755	68.09
8	0.2392	1755	68.55

**Tabella 5.** Assorbanza netta e le dosi misurate rispetto ai tempi di irraggiamento presso la sorgente LENA

I valori medi di dose misurati rispetto ai tempi di irraggiamento 1003 s, 1253 s, 1504 s e 1755 s sono 39.35 Gy, 49.08 Gy, 58.79 Gy e 68.32 Gy, rispettivamente; le differenze dei tempi di irraggiamento rispetto alla media dei 4 tempi di irraggiamento,  $t_{\text{irr}0} = 1379$  s, sono -376 s, -125 s, 125 s e 376 s; la media dei 4 valori di assorbanza netta misurati,  $\Delta A_{\text{mis}0}$ , è di  $0.1868 \text{ cm}^{-1}$ .

I valori medi di dose misurati rispetto alle differenze dei tempi di irraggiamento ( $t_{\text{irr}} - t_{\text{irr}0}$ ) sono riportati in figura 7 insieme ai residui ottenuti fittando i dati con una retta. Le barre d'errore rappresentano l'incertezza estesa della stima della dose di misura, 0.15 Gy. Il coefficiente angolare della retta,  $\alpha_{\text{mis}}$ , è di  $0.03854(13) \text{ Gy s}^{-1}$  e la dose di misura,  $D_{\text{mis}0}$ , corrispondente a  $t_{\text{irr}0}$ , è di  $53.89(4) \text{ Gy}$ .



**Figura 7.** Fit delle dosi di misura rispetto alle differenze dei tempi di irraggiamento

Assumendo, come già specificato in sezione 2, che la dose assorbita dai dosimetri nella fase di transiente OFF/ON e ON/OFF dell'irraggiamento sia trascurabile, il rateo di dose della sorgente LENA,  $R_{LENA II}$ , è calcolato dividendo la dose misurata,  $D_{mis 0}$ , per il tempo di irraggiamento,  $t_{irr 0}$  e risulta essere  $R_{LENA II} = 0.03908 \text{ Gy s}^{-1}$

Per la valutazione dell'incertezza tipo composta del valore di  $R_{LENA II}$  si considera che il contributo di tipo A dovuto alla misura della dose,  $(u(D_{mis 0}) / D_{mis 0}) R_{LENA II}$ , è di  $0.00003 \text{ Gy s}^{-1}$ , mentre il contributo di tipo B dovuto alla taratura del sistema dosimetrico consta di due componenti: una dovuta all'incertezza (0.9 %,  $k = 1$ ) dei valori di dose di riferimento della sorgente ENEA e una dovuta all'incertezza (0.31 Gy,  $k = 1$ ) dei valori di dose della sorgente LENA ottenuti mediante l'equazione (2). Il contributo di incertezza dovuto alla sorgente ENEA,  $u_{r ENEA} R_{LENA II}$ , è di  $0.00035 \text{ Gy s}^{-1}$  e il contributo dovuto all'utilizzo dell'equazione (2),  $(0.31 \text{ Gy} / D_{mis 0}) R_{LENA II}$ , è di  $0.00023 \text{ Gy s}^{-1}$ . I contributi dovuti al tempo di irraggiamento, alla temperatura della soluzione durante l'irraggiamento e durante la misura dello spettro UV-vis sono stati stimati dell'ordine di qualche decimo di percento e pertanto ritenuti trascurabili.

L'incertezza tipo composta relativa del valore del rateo di dose  $R_{LENA II}$  risulta di 1.1% e l'incertezza estesa ( $k = 2$ ) è di  $0.00084 \text{ Gy s}^{-1}$ .

### 3. Conclusioni

La misura del rateo di dose della sorgente LENA è stata effettuata mediante un sistema dosimetrico Fricke riferito al campione nazionale di dose assorbita in acqua dell'ENEA.

Sono stati effettuati irraggiamenti con valori di dose noti presso l'ENEA per la determinazione del coefficiente di taratura in termini di dose in acqua del sistema dosimetrico Fricke (soluzione dosimetrica e apparato di misura). Il coefficiente di taratura del sistema dosimetrico è risultato  $280.0 \text{ Gy cm}^{-1}$  con un'incertezza tipo composta relativa di 1.7 %.

Nell'utilizzo del sistema dosimetrico per la misura del rateo di dose erogato dalla sorgente LENA una opportuna scelta dei tempi di irraggiamento ha permesso di ridurre il contributo di incertezza dovuta alla taratura del sistema dosimetrico a circa 1 %.

Il rateo di dose assorbita in acqua erogata dalla sorgente LENA il 16/10/2015 è risultato  $(0.03908 \pm 0.00084) \text{ Gy s}^{-1}$  ( $k = 2$ ).

### Riferimenti

[1] Guerra, A.S., Laitano, R.F., Pimpinella, M., "Characteristics of the absorbed dose to water standard at ENEA", Phys. Med. Biol. 41 (1996) 657-674

[2] Kessler, C., Allisy-Roberts, P.J., Burns, D.T., Guerra, A.S., Laitano, R.F. and Pimpinella, M., "Comparison of the standards for absorbed dose to water of the ENEA-INMRI (Italy) and the BIPM for  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  rays" Metrologia, 47 (2010), Tech. Suppl., 06002 doi: 10.1088/0026-1394/47/1A/06002

[3] Dati confronto chiave BIPM-RI(I)-K4, [http://kcdb.bipm.org/appendixB/KCDB\\_ApB\\_search.asp](http://kcdb.bipm.org/appendixB/KCDB_ApB_search.asp)

[4] Standard Practice for Using the Fricke Reference-Standard Dosimetry System, ASTM International E 1026-04<sup>e1</sup>