



# Progetto TECHEA - Technologies for Health

## WorkPackage WP2

### Rapporto tecnico conclusivo

#### DELIVERABLE 5

*Concetta Ronsivalle, Alessandro Ampollini, Maria Denise Astorino, Giulia Bazzano, Fabio Fortini, Paolo Nenzi, Luigi Picardi, Vincenzo Surrenti, Emiliano Trinca*

FSN-TECFIS-APAM, Frascati

Ottobre 2023

# INDICE

INDICE .....	2
INDICE DELLE FIGURE.....	3
INDICE DELLE TABELLE .....	3
INTRODUZIONE .....	4
ATTIVITÀ SVOLTE NEL QUINTO ANNO .....	5
1. CARATTERISTICHE DEL PROTOTIPO TECHEA-WP2.....	5
2. SISTEMI DOSIMETRICI IMPLEMENTATI SULLA MACCHINA .....	8
3. CARATTERIZZAZIONE DELLA RADIAZIONE X PRODOTTA .....	9
4. MISURE DI RADIAZIONE AMBIENTALE.....	11
5. SPERIMENTAZIONE CON RAGGI X: IRRAGGIAMENTI DI CAMPIONI DI LIF.....	12
6. PRODOTTI DELLA RICERCA .....	13
CONCLUSIONI.....	17
BIBLIOGRAFIA .....	18

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1. Sketch con lo schema di principio del sistema TECHEA-WP2. ....	4
Figura 2. Prototipo TECHEA-WP2: a sinistra il sistema completo; a destra l'interno. ....	5
Figura 3. Convertitore elettronico-X: a sinistra lato tungsteno; a destra lato rame. ....	6
Figura 4. Vista dall'alto del collimatore in Piombo. ....	6
Figura 5. Tracce all'oscillografo durante l'operazione della macchina: in giallo la corrente all'uscita del linac (Iacc), in verde la tensione del cannone elettronico (Vgun); in magenta il segnale proporzionale alla potenza riflessa dalla struttura accelerante (Reflected Power); in blu la corrente prodotta dal cannone (Igun) iniettata nel linac. ....	7
Figura 6. Dosimetri impiegati su TECHEA-WP2: (a) Camera a ionizzazione PTW modello TM7862; (b) Camera SEMIFLEX PTW modello TM31010 montata all'interno del fantoccio di acqua solida. ....	8
Figura 7. A sinistra setup usato nelle misure di calibrazione (i punti SE e MC indicano rispettivamente le posizioni della Semiflex e della camera monitor); a destra la curva di calibrazione misurata. ....	9
Figura 8. Distribuzione trasversa della radiazione X misurata all'isocentro su gaf EBT3 irraggiata per 5 minuti. Profili X e Y relativi alla ROI selezionata. ....	9
Figura 9. Setup per la misura della curva PDD. ....	10
Figura 10. PDD misurata a TECHEA-WP2 confrontata con la curva teorica calcolata (elettroni da 3MeV con SAD 60 cm e le curve di riferimento per il Co60 con SAD 60 e 80 cm). ....	11
Figura 11. Misura della radiazione ambientale. A sinistra setup; a destra misure di radiazione ambientale attorno all'isocentro. ....	11
Figura 12. "Slab" del fantoccio ad acqua con alloggiamenti per i rivelatori di LiF. ....	12
Figura 13. Rivelatori di LiF posizionati nei relativi alloggiamenti. ....	12
Figura 14. Foto in primo piano dell'impianto TECHEA-WP2. ....	17
Figura 15. Impianto TECHEA-WP2 in rotazione. ....	17

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1: Parametri caratteristici del prototipo TECHEA-WP2. ....	7
Tabella 2: Parametri caratteristici della spot relativi ai profili orizzontale (X) e verticale (Y) ....	10
Tabella 3. Parametri degli irraggiamenti di rivelatori LiF con raggi X TECHEA. ....	13

## Introduzione

Il presente rapporto descrive le attività svolte nel quinto e ultimo anno del Progetto TECHEA nell'ambito del workpackage TECHEA-WP2 volto alla realizzazione di un sistema prototipale per radioterapia basato su un acceleratore lineare compatto di elettroni da 3 MeV, con generazione di raggi X tramite il meccanismo di Bremsstrahlung, per un efficace irraggiamento dei tumori al seno. La geometria del generatore compatto di raggi X consente lo sviluppo di un sistema di irraggiamento autoschermato e rotante attorno al "target" dotato di un lettino ove la paziente in posizione prona possa esporre la sola mammella al fascio di radiazioni ionizzanti, limitando così gli eventuali danni collaterali ai tessuti circostanti. Lo schema di principio del sistema è riportato in figura 1.

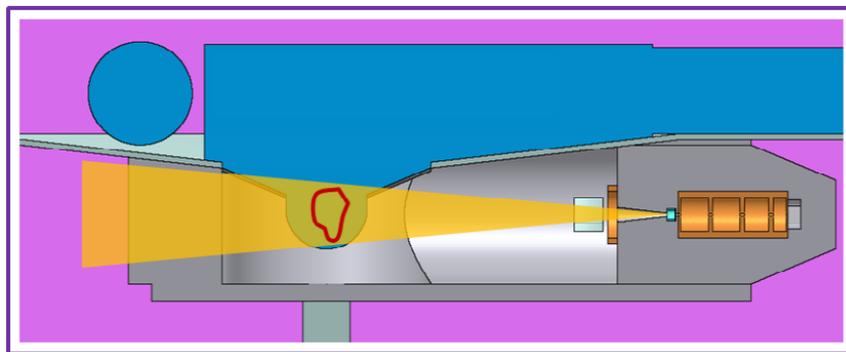


Figura 1. Sketch con lo schema di principio del sistema TECHEA-WP2.

Le attività svolte dal personale del Laboratorio APAM dell'ENEA hanno condotto alla piena realizzazione del prototipo sulla base della progettazione esecutiva dell'apparato descritta nei precedenti deliverables [1-4]. Attualmente la macchina è installata e operativa nel bunker B4 dell'Edificio 30 del CR Frascati dove nel quinto e ultimo anno di Progetto il sistema è stato completato e sono stati effettuati tutti i test sperimentali previsti volti a dimostrare la funzionalità del sistema. In particolare sono state svolte le seguenti attività:

1. Sono stati realizzati e montati il sistema di rotazione della sorgente attorno al target e il dispositivo di posizionamento del paziente.
2. Sono stati montati e calibrati i sistemi dosimetrici dedicati alla misura "on line" della radiazione X prodotta.
3. Sono state effettuate, in collaborazione con il Laboratorio di Fisica Medica e Sistemi Esperti dell'Ospedale IFO-IRE (Istituti Fisioterapici Ospedalieri - Istituto Regina Elena), misure di caratterizzazione della radiazione X nella posizione dell'isocentro tramite misure della curva PDD in fantoccio di acqua solida e di distribuzione trasversa della radiazione.

4. Con il personale del suddetto Laboratorio dell'IFO sono state anche condotte misure di radiazione ambientale.

5. Sono stati effettuati irraggiamenti con la radiazione X di rivelatori di radiazione basati su LiF (Fluoruro di Litio) sviluppati dal Laboratorio MNF nell'ambito del workpackage TECHEA-WP3.

Inoltre è stata svolta una attività di divulgazione dei risultati ottenuti nell'ambito di conferenze nazionali e internazionali con pubblicazione negli atti del congresso [5,6].

## Attività svolte nel quinto anno

### 1. Caratteristiche del prototipo TECHEA-WP2

Il prototipo TECHEA-WP2 si compone di

- 1- Sorgente di elettroni (cannone elettronico e acceleratore compatto a radiofrequenza in banda S da 3 MeV)
- 2- Generatore della potenza a radiofrequenza (magnetron da 2.5 MW di potenza di picco)
- 3- Alimentatore delle bobine del magnetron
- 4- Modulatore impiegato come driver per il magnetron
- 5- Sistema di raffreddamento
- 6- Guide d'onda, circolatore
- 7- Sistema di conversione elettroni-X
- 8- Collimatore
- 9- Schermatura locale in piombo

La foto del prototipo all'interno del bunker B4 (Ed. 30) è riportata in figura 2.



Figura 2. Prototipo TECHEA-WP2: a sinistra il sistema completo; a destra l'interno.

A sinistra il prototipo completo di un simulacro di lettino (un tavolo di plexiglass con un foro circolare adeguato per gli scopi dimostrativi del prototipo, ma che per l'applicazione clinica andrà sostituito con un lettino in fibre di carbonio) attorno al quale la sorgente di X ruota attorno all'isocentro posto a 60 cm

dall'uscita del linac di un angolo limitato a 270 gradi (invece di 360), il massimo angolo compatibile con lo spazio disponibile nel bunker di prova. Nella foto di destra che mostra il sistema con i pannelli di chiusura e il lettino rimossi sono visibili gli elementi collocati al suo interno.

Altri dettagli del sistema sono riportati nelle figure 3 e 4. Le foto della figura 3 mostrano i due lati del convertitore composto da una targhetta di Tungsteno dallo spessore di 400  $\mu\text{m}$  seguita da uno spessore di rame da 1.6 mm. Il rame serve a bloccare gli elettroni che escono dal tungsteno di modo che essi non contaminino la radiazione X prodotta. Il convertitore è utilizzato anche come bandierina per la lettura della corrente del fascio di elettroni accelerati all'uscita del linac.

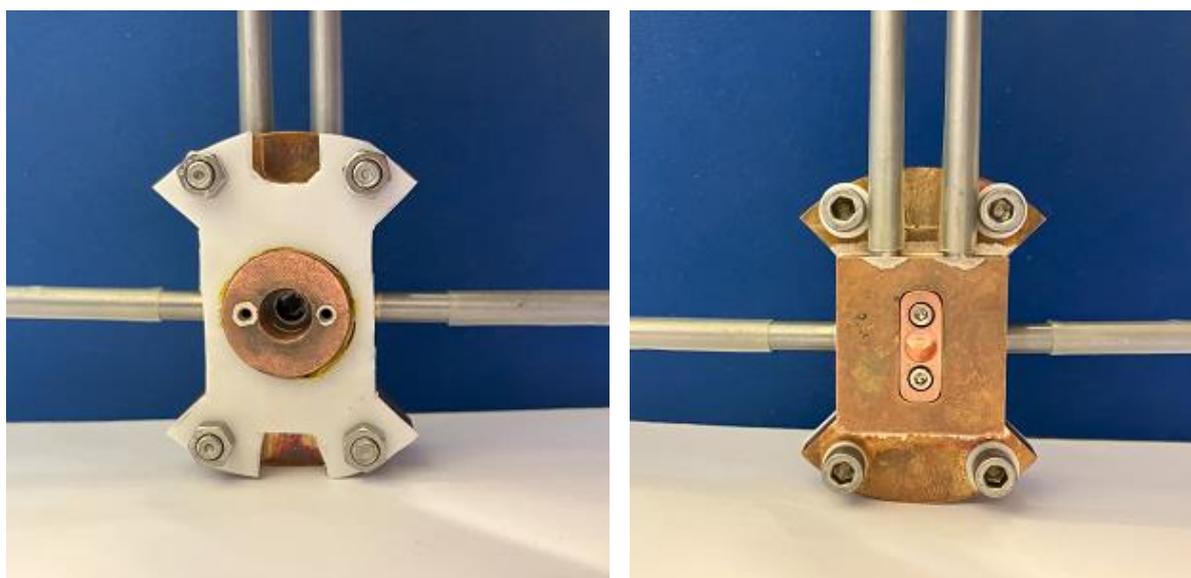


Figura 3. Convertitore elettroni-X: a sinistra lato tungsteno; a destra lato rame.

La figura 4 mostra la vista superiore del collimatore di Piombo usato anche come schermatura locale nel quale anche il linac è inserito. All'interno del collimatore subito dopo il linac è praticato un cono di apertura angolare di 13 gradi. Dopo la zona dell'isocentro posizionato a 60 cm dall'uscita del linac è posizionato il "dump" della radiazione anch'esso in piombo.

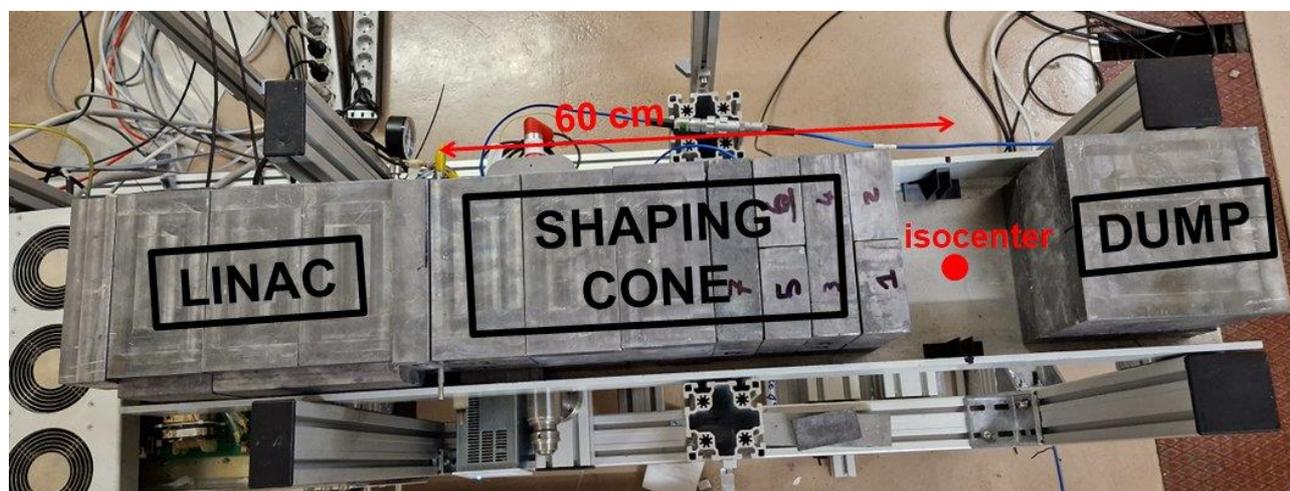


Figura 4. Vista dall'alto del collimatore in Piombo.

Le principali caratteristiche nella tipica operazione del prototipo sono riportate in tabella 1.

Tabella 1: Parametri caratteristici del prototipo TECHEA-WP2

Angolo di rotazione della sorgente	270 gradi
Distanza sorgente-isocentro	60 cm
Corrente del fascio di elettroni (max)	120 mA
Energia del fascio di elettroni	3 MeV
Durata dell'impulso	3.5 $\mu$ sec
Frequenza di ripetizione	100 Hz
Dose rate all'isocentro	1.5 Gy/min
Diametro della spot	14 cm

Il valore di 3 MeV per l'energia degli elettroni è stato scelto allo scopo di realizzare una sorgente di fotoni equivalente ad una unità di trattamento basata su  $^{60}\text{Co}$  e di ridurre la radiazione ambientale rispetto ad una tipica unità da 6MV. A differenza degli acceleratori medicali convenzionali o delle unità  $^{60}\text{Co}$  units, che hanno una tipica SSD (Source Surface Distance) rispettivamente di 100 cm e 80 cm, la volontà di realizzare una macchina compatta ha condotto a scegliere una SSD di 60 cm. Accurate simulazioni Monte Carlo [7] hanno mostrato che PDD (Percentage Depth Dose) di 3MV confrontate con PDD di  $^{60}\text{Co}$  a una SAD (Source Axis Distance) di 60 cm sono molto simili fino a una profondità di 10÷12 cm (corrispondente allo spessore medio del volume di trattamento).

Nella figura 5 è riportata l'immagine dello "screenshot" dell'oscillografo con i segnali rilevati nelle condizioni tipiche di operazione dell'acceleratore.



Figura 5. Tracce all'oscillografo durante l'operazione della macchina: in giallo la corrente all'uscita del linac (Iacc), in verde la tensione del cannone elettronico (Vgun); in magenta il segnale proporzionale alla potenza riflessa dalla struttura accelerante (Reflected Power); in blu la corrente prodotta dal cannone (Igun) iniettata nel linac.

## 2. Sistemi dosimetrici implementati sulla macchina

Per la dosimetria della radiazione X prodotta dalla sorgente vengono impiegati due dosimetri commerciali (Figura 6) prodotti dalla PTW [8,9]. Il primo è stato montato all'interno della schermatura di piombo e consiste di una camera monitor prodotta dalla PTW modello TM7862 costituita da una camera a trasmissione impiegata per utilizzo con unità radianti per radioterapia. Il diametro esterno è 119.5 mm e il suo volume di misura è 2.4 x 96.5 mm di diametro. Il secondo, dedicato alla misura della dose nella posizione del target, è una camera anch'essa prodotta dalla PTW miniaturizzata modello TM31010 Tipo Semiflex (volume 0.125 cm<sup>3</sup>, raggio 2.75 mm). La foto la mostra posizionata all'interno di uno dei pannelli che costituiscono il fantoccio di acqua solida usato per la caratterizzazione della radiazione X nel quale è stato praticato un apposito alloggiamento. Essa fornisce una misura assoluta della dose in acqua ed è stata utilizzata anche per la calibrazione della camera a trasmissione in modo da poter usare quest'ultima per controllare la dose durante l'irraggiamento quando la Semiflex viene rimossa per consentire il posizionamento del bersaglio.

Entambi i dosimetri vengono letti con un elettrometro TANGO. In figura 7 a sinistra è mostrato il setup usato nella procedura di calibrazione e a destra la curva che mette in relazione la dose misurata dalla Semiflex (SE) con la lettura sulla camera in trasmissione indicata come monitor chamber (MC). Davanti alla semiflex è posto uno spessore di acqua equivalente pari a 2x1.035 mm.

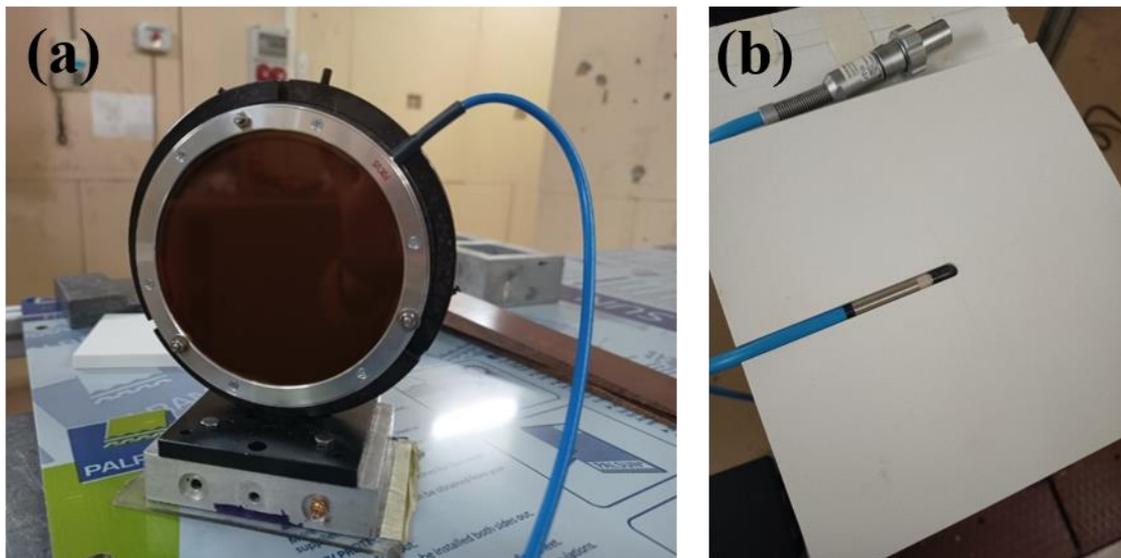


Figura 6. Dosimetri impiegati su TECHEA-WP2: (a) Camera a ionizzazione PTW modello TM7862; (b) Camera SEMIFLEX PTW modello TM31010 montata all'interno del fantoccio di acqua solida.

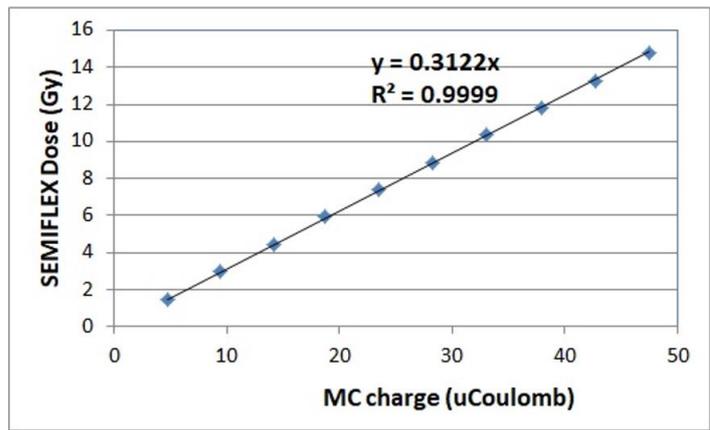
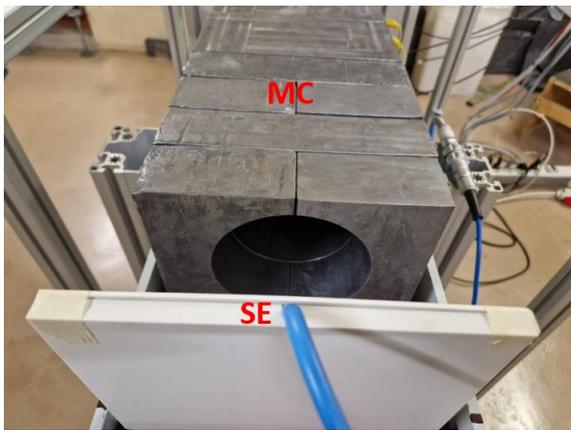


Figura 7. A sinistra setup usato nelle misure di calibrazione (i punti SE e MC indicano rispettivamente le posizioni della Semiflex e della camera monitor); a destra la curva di calibrazione misurata.

### 3. Caratterizzazione della radiazione X prodotta

La radiazione X prodotta è stata caratterizzata all'isocentro sia in termini di distribuzione trasversa tramite l'impiego di gaf di tipo EBT3, sia in termini di PDD spostando la Semiflex all'interno di un fantoccio di acqua equivalente (densità  $1.035 \text{ g/cm}^3$ ) composto da slabs di  $20 \times 20 \times 1 \text{ cm}^3$ .

La figura 8 mostra i profili orizzontale e verticale ricavati dalla spot su una gafcromica EBT3 irraggiata per 5 minuti posta all'isocentro con davanti 2 mm di fantoccio solido acqua equivalente, acquisita su uno scanner EPSON Expression XL10000/PRO flatbed in modalità trasmissione con risoluzione 400 dpi e 24 bit di profondità di colore.

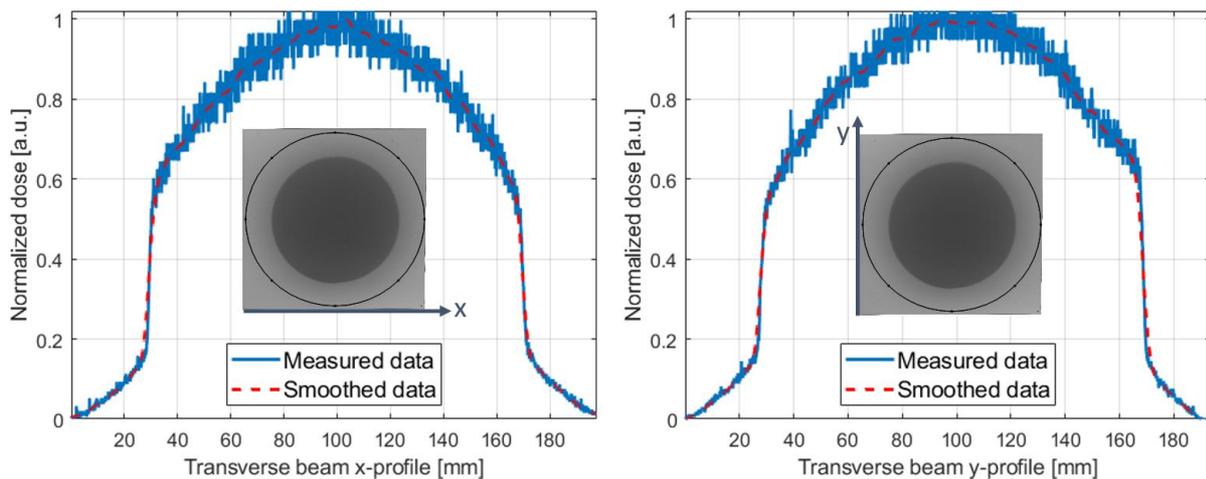


Figura 8. Distribuzione trasversa della radiazione X misurata all'isocentro su gaf EBT3 irraggiata per 5 minuti. Profili X e Y relativi alla ROI selezionata.

I parametri caratteristici della spot per i profili orizzontale (X) e verticale (Y) sono riassunti in tabella 2.

Tabella 2: Parametri caratteristici della spot relativi ai profili orizzontale (X) e verticale (Y)

	<b>Profilo orizzontale X</b>	<b>Profilo verticale Y</b>
<b>Full Width Half Maximum (FWHM)</b>	137.39 mm	137.77 mm
<b>Flatness</b>	17.06%	18.66%
<b>Lateral Symmetry</b>	0.51%	2.11%
<b>Intervallo 80% FWHM</b>	43.91-153.82 mm	41.73-151.94 mm
<b>80% FWHM</b>	109.91 mm	110.21 mm
<b>D80%-D20% sinistra</b>	27.25 mm	27.23 mm
<b>D80%-D20% destra</b>	28.21 mm	25.39 mm
<b>D80%-D20% media</b>	27.73 mm	26.31 mm
<b>Normalized Dose media</b>	0.89	0.90
<b>Coefficiente di variazione</b>	8.95%	9.53%
<b>(DoseMAX-DoseMin)/DoseMedia</b>	0.33	0.35
<b>Deviazione standard</b>	0.08	0.09

Per quanto riguarda la misura della PDD la figura 9 mostra il setup utilizzato basato sull'impiego della camera Semiflex nel fantoccio ad acqua solida precedentemente descritto e la figura 10 riporta il plot della curva misurata. Quest'ultima viene paragonata con la curva attesa da simulazioni Monte Carlo [7] e le curve di riferimento relative al cobalto 60. Si osserva che dal punto di vista della PDD la radiazione prodotta è equivalente a quella prodotta da una unità al Cobalto in accordo con quanto previsto dal Progetto. In figura 10 vengono riportate le curve del Cobalto sia quella standard a una SAD di 80 cm sia quella a una SAD di 60 cm come in TECHEA-WP2. La misura è stata progettata ed effettuata in collaborazione con la dottoressa A. Soriani dell'IFO.



Figura 9. Setup per la misura della curva PDD.

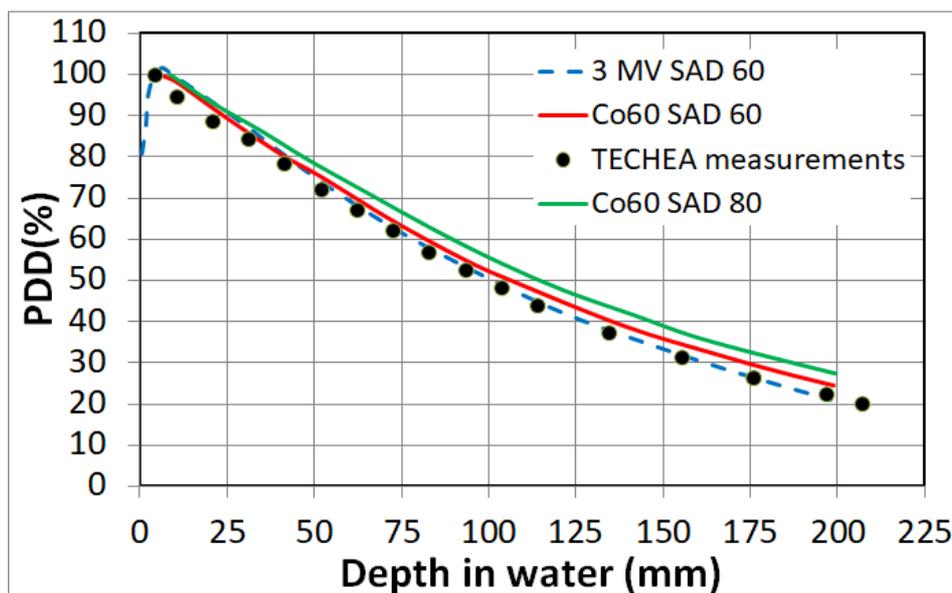


Figura 10. PDD misurata a TECHEA-WP2 confrontata con la curva teorica calcolata (elettroni da 3MeV con SAD 60 cm e le curve di riferimento per il Co60 con SAD 60 e 80 cm).

#### 4. Misure di radiazione ambientale

In collaborazione con la dottoressa A. Soriani dell'IFO sono state anche condotte misure relative alla radiazione ambientale. Uno degli obiettivi del Progetto è infatti la possibilità di effettuare gli irraggiamenti riducendo al minimo le richieste in termini di schermature.

Per le misure è stata utilizzata una camera portatile LUDLUM modello 9DP posizionata in 8 punti situati su un cerchio di raggio un metro centrato sull'isocentro. Durante le misure l'acceleratore è stato operato al massimo "dose rate" di 1.5 Gy/min, misurato con la camera Semiflex posta nel fantoccio nella posizione dell'isocentro. Il setup è mostrato nella foto a sinistra nella figura 11 che mostra la camera LUDLUM in una delle 8 posizioni selezionate. I risultati delle misure sono riportati nel plot a destra nella figura 11.

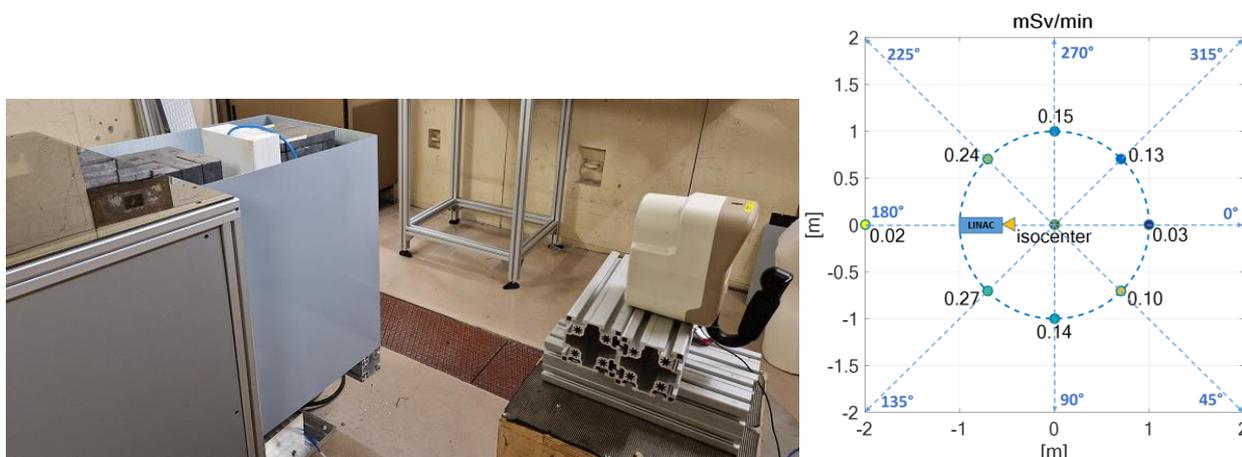


Figura 11. Misura della radiazione ambientale. A sinistra setup; a destra misure di radiazione ambientale attorno all'isocentro.

## 5. Sperimentazione con Raggi X: irraggiamenti di campioni di LiF

La radiazione X prodotta dalla sorgente TECHEA-WP2 è stata impiegata anche per la caratterizzazione di rivelatori di radiazione basati su LiF (Fluoruro di Litio) sviluppati nell'ambito del workpackage WP3 di TECHEA dal laboratorio MNF. Sono state irraggiate a dosi crescenti diverse tipologie di rivelatori per le quali a cura del Laboratorio APAM in base alle indicazioni fornite da MNF sono stati praticati degli opportuni alloggiamenti in una delle "slabs" del fantoccio di acqua solida (figura 12). In figura 13 sono visibili i diversi tipi di rivelatori (cristalli di dimensione 5x5 mm, pasticche di diametro 4.5mm, film NLiF) ivi posizionati.

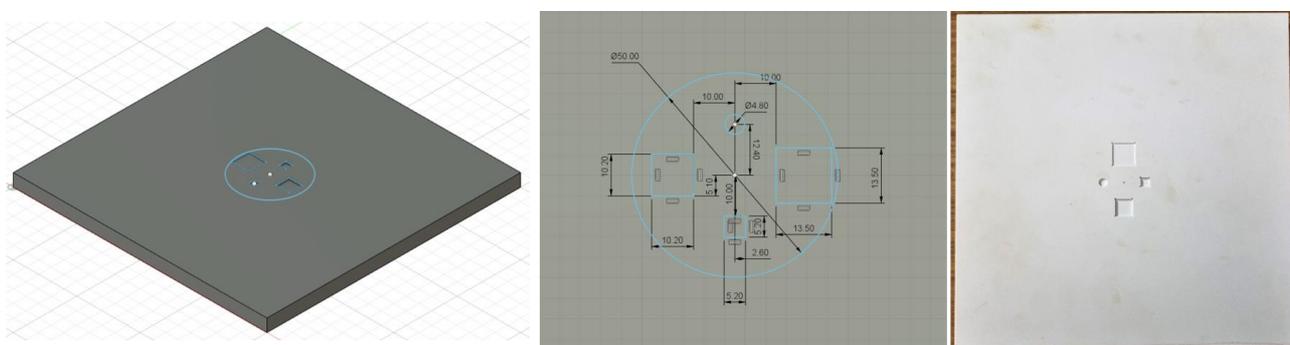


Figura 12. "Slab" del fantoccio ad acqua con alloggiamenti per i rivelatori di LiF.

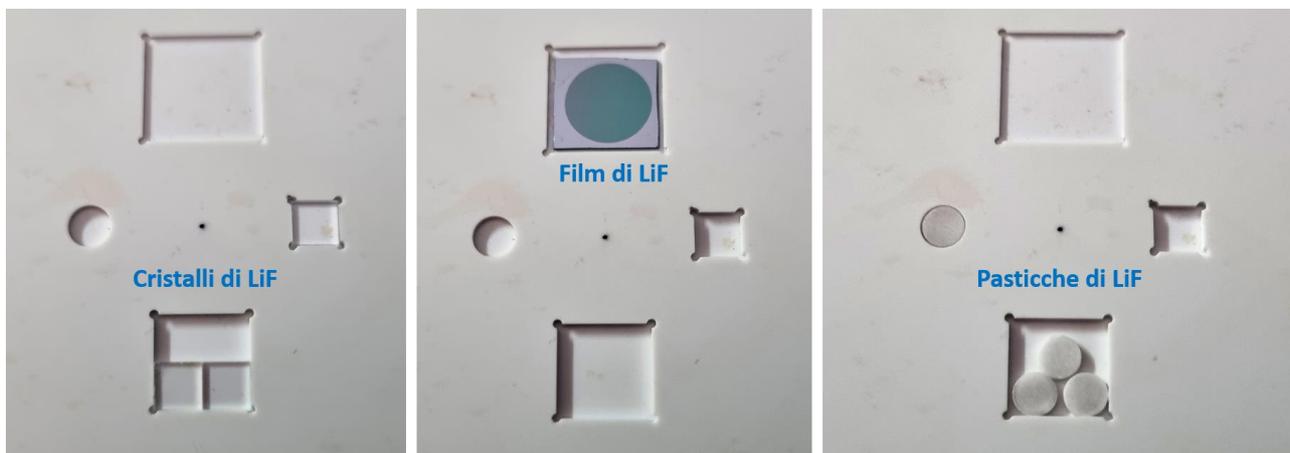


Figura 13. Rivelatori di LiF posizionati nei relativi alloggiamenti.

La tabella 3 riporta i parametri degli irraggiamenti effettuati al massimo dose rate della macchina (circa 1.5 Gy/min). In tabella Si(100) e VM2000 indicano i diversi substrati sui quali sono depositati i film di LiF.

Tabella 3. Parametri degli irraggiamenti di rivelatori LiF con raggi X TECHEA

N° irr.	Rivelatore	Quantità	Spessore (mm)	Dose nominale (Gy)	Dose (Gy)	Dose rate (Gy/min)	Durata irr.
1	Cristalli	3	1	1	0.99	1.42	42''
2	Cristalli	3	1	2	2.08	1.43	1' 27''
3	Cristalli	3	1	5	5.32	1.47	3' 37''
4	Cristalli	3	1	10	9.97	1.42	7'
	NLiF93 n°7 Si(100)	1	0.001				
5	Cristalli	3	1	20	21.01	1.46	14' 22''
	NLiF93 n°8 Si(100)	1	0.001				
6	Pasticche	4	0.89	1	1.01	1.44	42''
7	Pasticche	4	0.89	2	2.15	1.48	1' 27''
8	Pasticche	4	0.89	5	5.20	1.44	3' 37''
9	Pasticche	4	0.89	10	10.26	1.47	7'
10	Pasticche	4	0.89	20	21.05	1.46	14' 22''
	NLiF97 n°18 VM2000	1	0.0015				
11	NLiF94 n°12 Si(100)	1	0.002	20	21.00	1.46	14' 22''
12	NLiF95 n°12 Si(100)	1	0.0015	20	21.00	1.46	14' 22''
13	NLiF96 n°12 Si(100)	1	0.001	20	21.06	1.47	14' 22''
14	NLiF93 n°9 Si(100)	1	0.001	50	51.65	1.48	35'
15	NLiF93 n°11 Si(100)	1	0.001	100	103.55	1.48	1h 10'

## 6. Prodotti della ricerca

È stata avviata una campagna di disseminazione dei risultati conseguiti anche in considerazione dell'alto valore sociale della ricerca. Sono state effettuate due comunicazioni a congressi [5,6] delle quali riportiamo i relativi abstract:

- *"A compact and mobile system for breast irradiation in prone position"*, 14th International Particle Accelerator Conference (IPAC'23)

*Abstract:*

*"The APAM (Accelerators of Particles for Medical Application) Laboratory in the ENEA-Frascati Research Center developed a prototype of a self-shielded device dedicated to the*

*treatment of breast cancer with the patient in prone position. It consists of a rotating X-ray source, based on a compact 3 MeV electron accelerator, placed under the patient bed which is provided with a circular opening through which the breast hangs down and can be irradiated. The system has been designed to suitably screen the patient body from the underlying accelerator. This setup improves target coverage and gives a valuable advantage in sparing healthy tissues: prone position increases the separation of the target and critical organs and in addition minimizes target motion caused by breathing. The prototype has been developed in the framework of the TECHEA (TECHnologies for HEALth) Project aimed to the realization and validation of prototype systems for applications to health protection. The paper describes the apparatus and reports the results of the experimental characterization of the X-ray source done in collaboration with the Laboratory of Medical Physics and Expert Systems of Regina Elena Hospital.”*

- *“Dosimetric measurements of a dedicated compact linac prototype for breast cancer irradiation in prone position”, 12° Congresso Nazionale AIFM (Associazione Italiana di Fisica Medica e Sanitaria) 2023, Firenze*

*Abstract:*

*“A dedicated compact device has been developed, optimized and realized for treatment of breast cancer in prone position. The prone position increases the separation of the target and critical organs and minimizes target motion caused by breathing; in addition, it decreases dose delivered to Organs at Risk (OARs), such as lung and heart, allowing hypofractionated conformal RT treatments. Based on a design made by Monte Carlo simulation, a prototype has been realized at APAM (Accelerators of Particles for Medical Application) Laboratory in the ENEA-Frascati Research Center in the framework of the TECHEA (Technologies for Health) Project.*

*The prototype object of the measurements consists of a compact linear accelerator (linac) capable of producing a 3 MeV electron beam subsequently converted into a photon beam by means of an electron-X Tungsten-Copper (W-Cu) converter target. The linac parameters are: 100Hz pulse repetition frequency, 3.5  $\mu$ s pulse duration and 120 mA peak current. The primary collimator, consisting of a lead cone with an aperture of 13.5° and a length of 31 cm, is positioned after the target. The beam was characterized in terms of dose profiles, Percentage Depth Dose (PDD) and  $TPR_{20,10}$ . Measurements were carried out by means of Gafchromic EBT3 films and Semiflex PTW 31010 ionization chamber positioned in a solid water phantom. Radioprotection (RP) ambient dosimetry was also carried out.*

*The measurement of the PDD showed that the beam has a depth dose curve comparable to that obtained with a Co<sup>60</sup> source, already used in the past for breast treatments. A beam quality TPR<sub>20,10</sub> of 0.52 was measured. RP measurements have shown values compatible with the simulation and will be used for the calculation of the final shielding.*

*This first experimental characterization of this new type of X-ray source has been very encouraging and has shown us the way to best optimize the prototype being studied.”*

Inoltre è stata intrapresa in collaborazione con l'unità ENEA - Relazioni e Comunicazione (ENEA-REL) un'azione di divulgazione verso i media iniziata con la pubblicazione su ENEAinform@ in occasione della Giornata internazionale contro il cancro alla mammella (19/10/2023) [10] del seguente comunicato stampa:

- *“Un team di ricercatori ENEA ha messo a punto un prototipo innovativo in grado di trattare il cancro della mammella con applicazioni di radioterapia più efficaci e meno invasive. L'innovazione, denominata ProBREAST, è in grado di limitare al massimo i danni collaterali salvaguardando i tessuti sani [PROne Breast Rotating Electron Accelerator System Treatment] ed è stata resa nota oggi in occasione della Giornata internazionale contro il tumore al seno, istituita dall'Organizzazione Mondiale della Sanità per sensibilizzare sull'importanza della prevenzione.*

*Il prototipo è stato realizzato dai ricercatori del laboratorio ENEA di Acceleratori di particelle e applicazioni medicali del Centro Ricerche di Frascati ed ha come caratteristica principale il trattamento del tumore alla mammella con la paziente in posizione prona, invece che supina, al fine di risparmiare i tessuti sani circostanti, quali ad esempio polmoni e cuore. Rispetto ai sistemi tradizionali il prototipo si distingue non solo per la qualità e l'efficacia dell'irraggiamento, ma anche per la minore invasività in quanto si tratta di un sistema progettato per ridurre al minimo le richieste di schermatura della sala di trattamento. Queste caratteristiche lo rendono particolarmente indicato per i reparti di radioterapia, con benefici in termini di costi complessivi, tempi e riduzione delle liste d'attesa.*

*ProBREAST è pronto per una successiva fase di ingegnerizzazione e di commercializzazione da parte dell'industria: si compone di un tavolo provvisto di un'apertura circolare attraverso la quale è esposto il bersaglio (mammella) sotto cui è collocata una sorgente di fotoni rotante costituita da un piccolo acceleratore lineare di elettroni di energia 3 MeV (milioni di elettronVolt) seguito da un convertitore elettroni-X, il tutto montato su una struttura*

*girevole. L'apparato è schermato grazie a una particolare "camicia" protettiva di piombo destinata a contenere la radiazione diffusa nell'ambiente. Per la caratterizzazione della radiazione prodotta dalla sorgente, l'ENEA si è avvalsa della collaborazione dell'Ospedale oncologico IFO-IRE[\*\*] di Roma.*

*"Il nostro obiettivo come ente di ricerca è di 'ricercare l'innovazione' introducendo nuove tecnologie e rafforzando il dialogo con le imprese", sottolinea Concetta Ronsivalle, responsabile del laboratorio ENEA di Acceleratori di particelle e applicazioni medicali. "Il nostro laboratorio è aperto alla collaborazione con il mondo produttivo a partire dal trasferimento tecnologico e di know-how per costruire un'alleanza con le imprese, favorire processi di open innovation e creare progresso e benessere, obiettivo finale dell'infrastruttura TECHEA che stiamo costruendo all'ENEA di Frascati".*

*Il prototipo ProBREAST è stato realizzato nell'ambito del Progetto TECHEA (TECHnologies for HEAlth) condotto dalla Divisione ENEA di Tecnologie fisiche per la sicurezza e la salute, volto a realizzare e mettere in rete un'infrastruttura tecnologica di sviluppo, validazione e avvio alla commercializzazione di prototipi di sistemi, basati su tecnologie fisiche, per applicazioni finalizzate alla tutela della salute. L'attività si svolge in collaborazione con gli "end user" industriali interessati alla successiva commercializzazione dei prototipi più maturi.*

*Oltre agli acceleratori compatti per radioterapia, ENEA mette a disposizione dell'industria anche la sensoristica laser spettroscopica trasportabile per applicazioni in situ nel settore alimentare, la sensoristica indossabile in fibra ottica per il monitoraggio di pazienti durante diagnostiche nucleari o radioterapie, i rivelatori di radiazione per dosimetria basati su cristalli e film di fluoruro di litio."*

Riportiamo nel seguito alcune foto realizzate nell'ambito del servizio effettuato da REL. La foto in figura 14 mostra un primo piano dell'impianto e la sequenza in figura 15 mette in evidenza la possibilità di rotazione della sorgente attorno all'isocentro e quindi la capacità di irraggiamento del target da diversi angoli.



Figura 14. Foto in primo piano dell'impianto TECHEA-WP2.



Figura 15. Impianto TECHEA-WP2 in rotazione.

## Conclusioni

Il prototipo TECHEA-WP2 è stato completato e sono stati effettuati i test sperimentali che ne hanno confermato la coerenza con le caratteristiche previste da progetto e anche la riproducibilità dell'output in termini di dose rilasciata all'isocentro. La caratterizzazione dal punto di vista dosimetrico e la misura della radiazione ambientale sono state condotte in collaborazione con personale di IFO-IRE.

Per una effettiva applicazione clinica il prototipo realizzato richiede una opportuna ingegnerizzazione sia per quanto riguarda il sistema di controllo (per automatizzare l'operazione della macchina), sia per la parte

di “delivery” della radiazione (sostituzione del lettino dimostrativo con uno in fibre di carbonio, set di collimatori di varie dimensioni ed eventuale “multileaf collimator”, rinforzo della schermatura nella zona del lettino). Inoltre la macchina, una volta ingegnerizzata, andrà corredata da un TPS (Treatment Planning System) dedicato.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] C. Ronsivalle, G. Bazzano, F. Borgognoni, P. Nenzi, L. Picardi, M. Vadrucci, “*Rapporto tecnico relativo alla progettazione del sistema. DELIVERABLE 1*”, novembre 2019.
- [2] C. Ronsivalle, A. Ampollini, G. Bazzano, F. Borgognoni, F. Fortini, P. Nenzi, L. Picardi, V. Surrenti, E. Trinca, M. Vadrucci, “*Rapporto tecnico relativo alla progettazione e realizzazione del sistema. DELIVERABLE 2*”, novembre 2020.
- [3] C. Ronsivalle, A. Ampollini, M.D. Astorino, G. Bazzano, F. Fortini, P. Nenzi, L. Picardi, V. Surrenti, E. Trinca, M. Vadrucci, “*Rapporto tecnico relativo alle misure sperimentali di caratterizzazione del sistema. DELIVERABLE 3*”, novembre 2021.
- [4] C. Ronsivalle, A. Ampollini, M.D. Astorino, G. Bazzano, F. Fortini, P. Nenzi, L. Picardi, V. Surrenti, E. Trinca, “*Rapporto tecnico. DELIVERABLE 4*”, novembre 2022.
- [5] C. Ronsivalle, A. Ampollini, M.D. Astorino, G. Bazzano, F. Fortini, P. Nenzi, L. Picardi, E. Trinca, G. Iaccarino, A. Soriani, “*A compact and mobile system for breast irradiation in prone position*”, Proc. 14th International Particle Accelerator Conference (IPAC’23), pp. 5016-5019, Venice (Italy), 7-12 May 2023, <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC-23-THPM056>
- [6] A. Soriani, G. Iaccarino, M. D’andrea, M. Cazzato, M.D. Astorino, G. Bazzano, P. Nenzi, L. Picardi, C. Ronsivalle, “*Dosimetric measurements of a dedicated compact linac prototype for breast cancer irradiation in prone position*”, 12° Congresso Nazionale AIFM (Associazione Italiana di Fisica Medica e Sanitaria) 2023, Firenze (Italia), 8-11 giugno 2023, Physica Medica 115S1 (2023) 102979, <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2023.102979>
- [7] M. Cazzato, “*Development and Optimization using Monte Carlo simulation of a dedicated system for breast radiotherapy*”, Thesis, Specialization School in Medical Physics, Pharmacy and Medicine Department, Sapienza University, Rome, Italy, 2014.
- [8] <https://www.ptwdosimetry.com/en/products/x-ray-therapy-monitor-chamber-7862>
- [9] <https://www.ptwdosimetry.com/en/products/semiflex-ionization-chamber-31010>
- [10] <https://www.media.enea.it/comunicati-e-news/archivio-anni/anno-2023/salute-radioterapia-innovazione-enea-per-trattare-il-tumore-al-seno.html>