

# Study of the leakage radiation generated in the components of a linear accelerator

Richard A. Barrios \* 

*Grupo de Física Computacional. Departamento de Física. Facultad de Ciencia y Tecnología. Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.*



<https://doi.org/10.54139/revinguc.v28i2.26>

**Abstract.-** The characteristics of the leakage radiation from a linear accelerator were studied. A simulation process was executed using the Monte Carlo simulation program PENELOPE Ver. 2006, the values of energy, position and direction of the particles were stored in a phase space file. The energies 6, 12 and 18 MeV and the particle source, scattering sheet, filter, ionization chamber and tungsten collimator system were selected. Inferential statistics were used for the analysis. The results show that the scattering angles associated with each component can vary from 30° to 180°, the average energies of the particles under study are also presented, observing that as the initial energy of the beam increases, the production of electrons and secondary photons also increases. It was observed that the number of positrons detected increases as the initial energy of the source electrons increases and that the scattering foil, the filter and the collimator blocks are the components with the greatest dispersive capacity. The method permits the identification of the main sources of leakage radiation and the main characteristics of such radiation as well as its type.

**Keywords:** Linear Accelerator; Particle Transport; Monte Carlo Simulation; Particle dispersion; Leakage radiation.

## Estudio de la radiación de fuga generada en el cabezal de un acelerador lineal

**Resumen.-** Fueron estudiadas las características de la radiación de fuga de un acelerador lineal. Se ejecutó un proceso de simulación empleando el programa de simulación Montecarlo PENELOPE Ver. 2006, se almacenaron los valores de la energía, la posición y la dirección de las partículas en un archivo de espacio de fases. Fueron seleccionadas las energías 6, 12 y 18 MeV y la fuente de partículas, la lámina dispersora, el filtro, la cámara de ionización y el sistema colimador de wolframio. Para el análisis se empleó estadística inferencial. Los resultados muestran que los ángulos de dispersión asociados a cada componente pueden variar desde 30° hasta 180°, se presentan además las energías medias de las partículas bajo estudio, observándose que en la medida en que aumenta la energía inicial de las partículas aumenta también la producción de electrones y fotones secundarios, se observó que el número de positrones detectados se incrementa al aumentar la energía inicial de los electrones de la fuente y que la lámina dispersora, el filtro y los bloques colimadores son los componentes con mayor capacidad dispersiva. El método permite identificar las principales fuentes de radiación de fuga y las características principales de dicha radiación así como su tipo.

**Palabras clave:** Acelerador lineal; Transporte de partículas; Simulación Monte Carlo; Dispersión de partículas; Radiación de fuga.

Recibido: 23 de mayo, 2021.

Aceptado: 14 de junio, 2021.

### 1. Introducción

La contaminación por radiación es un aspecto propio del uso de los aceleradores lineales (LINAC) el cual debe ser estudiado y cuantificado. En tal

sentido la simulación Monte Carlo (MC) permite la determinación de las características físicas debidas a dicha contaminación [1]. La interacción de los electrones con los diversos componentes del LINAC conduce a la dispersión de los mismos así como a la producción de fotones secundarios. El impacto de tales partículas en el cuerpo mismo del paciente puede elevar las probabilidades de padecer cáncer, por estas razones conviene conocer y cuantificar este tipo de radiación secundaria [2].

\* Autor para correspondencia:

Correo-e: richbr2014@gmail.com (R. A. Barrios)

El estudio de la generación de radiación secundaria incluye también la producción de neutrones debida a la aceleración de electrones en LINAC's empleados en radioterapia intraoperatoria (IORT). Este tipo de estudio se realiza regularmente empleando para ello los archivos de espacio de fases (PSF) [3] para la determinación de la contaminación por radiación. Se presenta en el mencionado trabajo el estudio de la radiación generada por neutrones producidos en torno a dos LINAC's siguiendo un conjunto seleccionado de ángulos relativos a la dirección del haz primario [4]. La exposición a sobredosis debidas a las radiaciones secundarias es un problema conocido desde hace tiempo, a finales de la década de 1980 se produjo un accidente importante relacionado con la exposición de un paciente a la radiación de un acelerador, el problema se debió al malfuncionamiento del sistema de control de la radiación aplicada en el paciente [5]. La determinación de los niveles de radiación de fuga en entornos asociados a los aceleradores lineales es un proceso complejo, tal actividad es posible simulando los espectros de radiación empleando simulación MC [6]. La caracterización de los espectros de radiación de fuga en entornos cercanos al acelerador lineal es posible al emplear simulación MC para determinar los niveles de contaminación en puntos específicos cercanos al acelerador [7].

La radiación de fuga es un componente importante en la estimación de la razón dosis-dispersada/dosisincidente. La estimación de esta magnitud es dependiente de la radiación de fuga del cabezal acelerador, el mencionado cociente permite optimizar el diseño del blindaje de los LINAC's [8]. El trabajo de Shobe permite estimar el blindaje requerido para un generador de fotones para energías del haz entre 6 y 25 MV. En el mismo se observa que las mayores dosis de radiación se detectan en el rango de  $0^\circ$  a  $30^\circ$  [9]. Los aplicadores empleados en la conformación del haz de radiación también pueden afectar el haz de radiación producido en la fuente al emitir radiación secundaria [10]. El conocimiento de la radiación de fuga permite además la optimización del proceso de diseño y fabricación de algunos de los componentes

del LINAC tal como los aplicadores empleados en la delimitación del haz de radiación a ser empleado en los procedimientos de radioterapia [11]. La fase de validación de los procedimientos necesarios en la etapa de planificación del tratamiento requiere del conocimiento de la radiación secundaria generada en los colimadores multilamina propios de los aceleradores [12]. La optimización de los procedimientos empleados en radioterapia involucran el conocimiento de todas las fuentes de radiación presentes aún siendo las dosis de baja intensidad. Esta condición conduce a la necesidad de modelar tales fuentes de radiación secundaria [13]. La radiación considerada en el presente estudio está referida a la radiación delimitada por zonas espaciales en forma de conos los cuales conforman la radiación secundaria generada por los componentes del LINAC.

Tales zonas espaciales presentan características diferentes las cuales dependen del componente, la energía del haz y el tipo de partícula. Para la realización del presente trabajo fue necesario realizar la simulación del transporte de los electrones que emergen de una fuente del tipo pencil-beam. La simulación fue realizada empleando el programa de simulación de transporte PENELOPE Ver. 2006 [14, 15, 16], fueron simuladas  $10^7$  historias y se generó un archivo de espacio de fases [PSF] (Phase Space File). Para la ejecución de la simulación se empleó la información técnica de un acelerador lineal Mevatron KDS de Siemens [17]. En el presente estudio se emplearon energías del haz de 6, 12 y 18 MeV para la simulación del transporte de partículas, en todos los casos se consideró un haz de electrones primarios originado de una fuente puntual monoenergética y monodireccional [18], a continuación se procedió a la separación de los electrones, fotones y positrones producidos por la colisión inicial de los electrones con los componentes seleccionados del LINAC. La información relacionada con las partículas generadas fue separada en archivos PSF y a continuación se procedió a la extracción de las distribuciones estadísticas. El objetivo principal a ser alcanzado es estudiar las características de la radiación de fuga generada en un conjunto seleccionado de componentes de un acelerador lineal (LINAC)

Mevatron KDS para los valores indicados. Entre los objetivos secundarios planteados tenemos: identificar los intervalos angulares de dispersión de las diversas partículas emergentes, caracterizar la distribución angular de la radiación de fuga del cabezal, identificar los rangos promedios detectados de energía en las partículas emergentes, determinar los valores medios de la energía de las partículas que emergen de los componentes seleccionados del acelerador e identificar los sitios predominantes desde donde emergen, las partículas bajo estudio.

## 2. Metodología

El trabajo se ejecuta esencialmente en tres etapas, en la primera se desarrolla la totalidad de la simulación de transporte de un haz de electrones, simulación que se inicia en el momento en que emergen los electrones de la fuente y que finaliza cuando se almacenan en el [PSF], la segunda etapa es referida a la separación de información relativa a las partículas generadas por componentes seleccionados del LINAC y por último, la tercera etapa o etapa de análisis estadístico.

En esta última etapa se estudian los valores mínimos, los valores medios y la desviación estadística de los ángulos de dispersión obtenidos y sus valores de energía empleándose para el análisis la estadística normal.

Para determinar los parámetros estadísticos seleccionados ( $\theta_{med}, \sigma, \theta_{min}$ ) y proceder a su análisis, el espacio de fases total ( $[PSF]_{tot}$ ) fue separado en tres subespacios parciales  $[PSF]_{electron}$ ,  $[PSF]_{foton}$ ,  $[PSF]_{positron}$  conteniendo cada uno la siguiente información: El tipo de partícula (KPAR), la energía (E), el coseno director  $[w_i] = \cos([\theta_i])$  el cual permite el estudio de los ángulos de dispersión y el componente del LINAC que originó dicha partícula. Los parámetros incluidos en cada uno de los  $[PSF]_{parciales}$  fueron:

1. Tipo de partícula (electrón, fotón, positrón).
2. Componente del LINAC que generó dicha partícula.
3. Intervalo de dispersión de la partícula seleccionada.

Los porcentajes fueron obtenidos empleando estadística inferencial.

A fin de caracterizar la dispersión de las partículas emitidas en los diferentes componentes del LINAC es necesario separar las curvas que caracterizan tal dispersión. Por esta razón estudiaremos las proyecciones  $[w_i] = \cos([\theta_i])$  del vector de ubicación del punto P sobre el eje +Oz. En el procedimiento se hace énfasis en la determinación del valor mínimo del ángulo de dispersión de cada partícula como se visualiza en las Figuras 1 y 2.

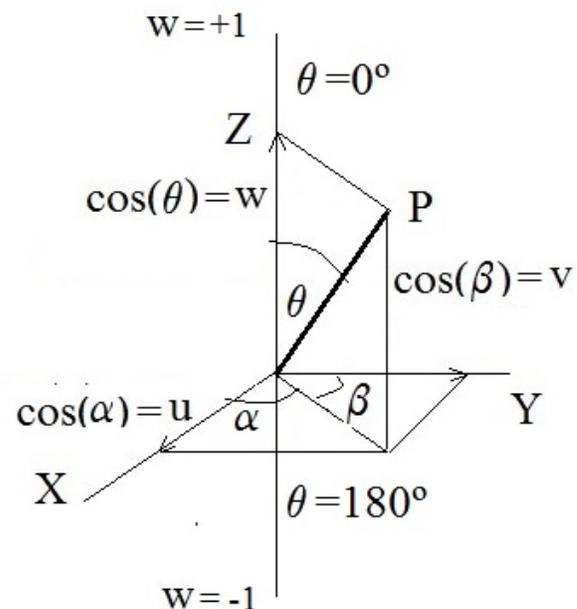


Figura 1: Proyección del vector de ubicación de P sobre los tres ejes coordenados según los cosenos  $u, v, w$

## 3. Resultados y discusión

La simulación Monte Carlo ofrece una herramienta de estudio de transporte de gran eficiencia y potencialidad. La posibilidad de separar la simulación en etapas y el empleo de los espacios de fases permiten la ejecución de elaborados proyectos de análisis estadístico. Se presentan a continuación los resultados mas notables relacionados con la energía y la posición de las partículas emitidas por los diversos componentes, los valores medios,

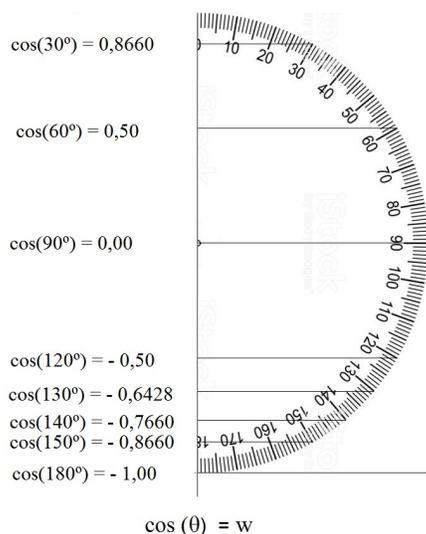


Figura 2: Proyección del vector de ubicación de  $P$  sobre el eje  $+oZ$  según la relación  $\cos(\theta) = w$

mínimos, la desviación estándar y la presencia de positrones. Para el estudio de los intervalos de dispersión nos basaremos en los resultados numéricos almacenados en la Tabla 1 donde se registran los valores  $\theta_{med}$  del ángulo de dispersión, la desviación estándar, el valor mínimo de los ángulos de dispersión espacial para electrones y fotones para las energías 6, 12 y 18 MeV empleadas en la simulación. Para el análisis de los valores de la energía de las partículas dispersadas nos basaremos en la información almacenada en la Tabla 2.

Se presentan los aspectos más notables relacionados con la energía y la posición de las partículas emitidas por los diversos componentes, los valores medios, mínimos, la desviación estándar y la presencia de positrones. Al analizar los estimadores estadísticos para el haz de menor energía se observa que los valores de la desviación estándar ( $\sigma = STDV$ ) más elevados están asociados al sistema colimador. Se observa además que este componente presenta los mayores valores de dispersión con valores STDV que varían entre 10,20 para 6 MeV y 11,12 para  $E = 18$  MeV destacando además ángulos de dispersión cercanos a  $130^\circ$  (considerablemente alejados a  $180^\circ$ ) como se indica en la Figura 1. Los menores valores de  $\sigma$  se observan en el filtro aplanador para los tres casos. Podemos observar, en términos generales, que los mayores valores de dispersión, en todos los

casos están asociados a la energía  $E = 18$  MeV según la Tabla 1.

La lámina dispersora también muestra importantes valores de STDV que van desde  $\sigma = 5,57$  para  $E = 6$  MeV hasta  $\sigma = 10,36$  para  $E = 18$  MeV. Los menores valores de  $\sigma$  están asociados al filtro aplanador. El valor del ángulo medio de dispersión varía aproximadamente entre  $151^\circ$  (observado en la fuente) y  $174^\circ$  (detectado en la cámara de ionización) para las tres energías consideradas y en todos los componentes del LINAC de acuerdo con la Tabla 1. El sistema colimador del LINAC es un importante centro dispersor de electrones para los tres valores de la energía lo cual se comprueba al observar los valores de  $\sigma$ . El valor medio de dispersión, en el colimador, varía ligeramente en torno a 10 como se registra en la Tabla 1. Podemos observar que en todos los casos se detectan partículas que dispersan hasta alcanzar ángulos cercanos a  $144^\circ$  (considerablemente alejados a  $180^\circ$ ), los valores de  $\theta_{min}$  se muestran en la Tabla 1. Pueden observarse además los niveles elevados de dispersión de los electrones al colisionar con la lámina dispersora. Los valores de STDV para los electrones se indican en la Tabla 1 para todas las energías consideradas.

Al considerar la dispersión de las trayectorias de los fotones observamos, en términos generales, que estos se dispersan menos dado que la media de la dispersión hallada ( $\theta_{med}^{foton} \approx 174^\circ$ ) se aproxima más a  $180^\circ$ , como se evidencia en la columna  $\theta_{med}$  de la Tabla 1, que el valor observado para el valor medio de dispersión de los electrones ( $\theta_{med}^{electron} \approx 165^\circ$ ) más alejado de  $180^\circ$ , destacan además los elevados valores de dispersión de los fotones que emergen del sistema colimador ( $STDV \approx 10$ ) y valores de  $\theta_{med} \approx 155^\circ$  bastante alejados de  $180^\circ$  (ver los valores medios para las tres energías consideradas) al compararlos con los valores medios observados en los demás componentes. Resaltan, además, para los tres valores de  $E$  y los diferentes componentes del LINAC, elevados ángulos de dispersión de los fotones, que van desde  $\theta \approx 36^\circ$  (ángulo detectado para  $E = 18$  MeV en el sistema colimador) hasta  $\theta \approx 69^\circ$  (para la energía  $E = 12$  MeV en el sistema

Tabla 1: Valores de la media (TH-MEDIO), la desviación estándar (STDV), el valor mínimo de los ángulos de dispersión espacial (TH-MIN) para electrones y fotones y para las energías 6, 12 y 18 MeV detectadas en el LINAC

Energía (MeV)	Componente	Electrones			Fotones		
		TH-medio	STDV	TH-min	TH-medio	STDV	TH-min
6	Fuente	151,86	2,73	144,73	173,81	4,05	145,32
	Lámina dispersora	169,08	5,57	144,48	172,41	5,00	144,75
	Filtro	173,27	1,99	141,88	173,24	2,77	143,33
	Cámara de ionización	173,07	2,76	143,98	172,75	2,87	164,43
	Sistema colimador	161,28	10,20	131,23	154,20	9,98	45,21
12	Fuente	151,25	2,63	144,84	175,86	2,31	145,59
	Lámina dispersora	164,92	8,51	144,54	174,22	3,16	144,97
	Filtro	173,22	1,62	143,31	174,17	2,42	143,37
	Cámara de ionización	173,94	2,35	141,94	173,62	2,53	159,89
	Sistema colimador	161,15	10,40	129,87	154,91	10,13	68,62
18	Fuente	151,06	2,70	144,83	176,73	1,86	145,38
	Lámina dispersora	159,09	10,36	144,42	173,89	3,67	144,49
	Filtro	173,00	1,35	142,36	174,60	2,25	143,57
	Cámara de ionización	174,35	2,10	169,92	174,09	2,32	164,41
	Sistema colimador	159,55	11,12	132,03	155,05	10,06	36,39

Tabla 2: Valores de la energía media (E-MEDIA) y la desviación estándar (STDV) de la dispersión de la energía media para electrones y fotones y para las energías 6, 12 y 18 MeV detectadas en el LINAC

Energía (MeV)	Componente	Electrones ( $eV \cdot 10^6$ )		Fotones ( $eV \cdot 10^6$ )	
		E-media	STDV	E-media	STDV
6	Fuente	4,73	1,71	1,12	1,09
	Lámina dispersora	5,52	0,52	1,15	1,11
	Filtro	5,49	0,22	1,08	1,02
	Cámara de ionización	5,33	0,33	1,08	1,05
	Sistema colimador	4,65	1,23	1,31	1,23
12	Fuente	5,56	5,15	2,02	2,31
	Lámina dispersora	11,50	1,76	2,09	2,40
	Filtro	11,90	0,63	1,92	2,23
	Cámara de ionización	11,50	0,80	1,91	2,24
	Sistema colimador	9,34	3,14	1,99	1,83
18	Fuente	1,91	6,86	3,01	3,72
	Lámina dispersora	16,70	4,00	3,03	3,75
	Filtro	17,80	1,67	2,70	3,44
	Cámara de ionización	17,60	1,85	2,72	3,48
	Sistema colimador	12,50	5,79	2,43	2,52

colimador) que emergen del LINAC, valores muy alejados de  $180^\circ$ , como se indica en la Tabla 1.

Se estableció un nivel de confianza de 75 % ( $z = 0,375$ ) para estimar el porcentaje de dispersión de los electrones en los intervalos ( $0 \leq \theta \leq \theta_{med}$ ) y ( $\theta \geq \theta_{med}$ ) donde  $\theta = \sigma \cdot z + \mu$ ,  $\sigma = STDV$  y  $\mu = \theta_{med}$  observándose que aproximadamente un 35 % de las partículas dispersan con valores ( $\theta \geq \theta_{med}$ ) y el 65 % dispersa en el rango ( $0 \leq \theta \leq \theta_{med}$ ), aproximadamente, para los tres valores de la energía y para todos los componentes del LINAC. Los valores de  $\theta_{med}$  obtenidos pueden observarse en la Tabla 1. Conviene mencionar el cambio del

valor de la energía E-MEDIA de los electrones al compararlos con los valores nominales de la energía. Al revisar la dispersión de energía del haz de electrones es conveniente resaltar, en términos generales, el incremento constante de la desviación estándar STDV para los tres valores de  $E$  en todos los componentes del LINAC lo que demuestra la dispersión del haz de energía en los tres casos, como se evidencia en la Tabla 2.

Para estudiar los valores medios de la energía de los electrones dispersados se consideró un intervalo de confianza de 75 % ( $z = 0,375$ ) y se determinaron las probabilidades de que las partículas tuvieran

Tabla 3: Positrones detectados en la simulación para las energías 6, 12 y 18 MeV en los componentes del LINAC

Componente	Energía (MeV)		
	6	12	18
Fuente de electrones	0	0	2
Lámina dispersora	1	4	221
Filtro	0	1	19
Cámara de ionización	0	0	1
Colimador	50	309	1753

energías en los intervalos ( $0 \leq E \leq E_{med}$ ) y ( $E \geq E_{med}$ ), donde  $E = \sigma \cdot z + \mu$ ,  $\sigma = \text{STDV}$  y  $\mu = E_{med}$ . Se verifica estadísticamente que para los tres valores de  $E$  aproximadamente un 64 % de los electrones dispersa, en términos generales, con energías en el rango ( $0 \leq E \leq E_{med}$ ) y el 35 % del valor de la energía es dispersada por los electrones en el intervalo ( $E \geq E_{med}$ ). Los valores de  $E_{med}$  se muestran en Tabla 2.

Podemos observar que los valores medios de la energía de los fotones aumenta de forma constante. Los valores de la desviación estándar STDV también aumentan en forma sostenida en todos los componentes y para los tres valores de  $E$ . Estos valores medios de la energía, son en términos generales menores que los observados en el caso de los electrones. Los valores de STDV muestran que estos son haces mas coherentes al compararlos con los haces de electrones. En el caso de las colisiones de los fotones con las láminas dispersoras, estos muestran el mayor valor de la dispersión para el menor valor de  $E$ , como se registra en la Tabla 1.

Conviene resaltar que el mayor valor observado de dispersión esta asociado al sistema colimador para  $E = 18 \text{ MeV}$ . El sistema colimador, en todos los casos, es el elemento con mayor poder dispersor según lo mostrado en la Tabla 2. En el caso de la energía de los fotones dispersados se observa, en la totalidad de los casos, que el 35 % de la energía de dichas partículas es mayor a los valores medios. Al estudiar las probabilidades de obtener dispersión de energías en el rango ( $0 \leq E \leq E_{med}$ ), podemos observar que, al aumentar el valor nominal de la energía del haz, dicha probabilidad disminuye gradualmente para cada componente del LINAC y para los tres valores de la energía  $E$ .

La simulación ejecutada permitió detectar producción de positrones. En la Tabla 3 se registran los positrones identificados. Podemos observar que tanto la lámina dispersora como el colimador producen positrones. Es importante destacar que la proporción de positrones emitidos en el colimador es considerablemente mayor que la producida por la lámina según la información mostrada en la Tabla 3. Destaca el hecho de que todos los componentes del LINAC están en capacidad de generar positrones debido a su composición metálica incluso la cámara de ionización. Debemos recordar que entre los elementos constituyentes de la cámara tenemos el oro, elemento capaz de producir positrones.

#### 4. Conclusiones

La metodología expuesta puede ser aplicada en el estudio de la radiación de fuga en aceleradores lineales de diversos orígenes. Para tal fin solo se requiere conocer la geometría del cabezal del LINAC, los materiales empleados en su fabricación y el software de simulación Monte Carlo considerando la complejidad de este tipo de estudios y la potencia y versatilidad de este tipo de programas.

En este estudio se consideró la radiación dispersada por el cabezal acelerador de un LINAC Mevatron KDS compuesta por electrones, fotones y positrones de energías 6, 12 y 18 MeV. La información contenida en los espacios de fase generados en la simulación permitió su empleo en el estudio de la radiación de fuga producida en los cabezales de los aceleradores lineales. Los resultados confirman que dicha técnica es adecuada para evaluar la radiación de fuga en dichos dispositivos [1, 3, 6].

Se detectaron elevados valores de dispersión de ambos tipos de partículas. La existencia de la radiación de fuga es confirmada por el hecho de que el valor del ángulo medio de dispersión determinado varía entre  $151^\circ$  (detectado en la fuente de partículas) y  $174^\circ$  (detectado en la cámara de ionización). Se verificó también la mayor coherencia del haz de fotones al comparar los

valores medios de los ángulos asociados a ambos haces.

Los resultados confirmaron que los fotones pueden presentar elevados niveles de dispersión al emerger del sistema colimador pudiendo detectarse ángulos tan pequeños como  $\theta_{disp} \approx 36^\circ$ . En todos los casos se detectaron partículas capaces de alcanzar ángulos de dispersión cercanos a  $144^\circ$ . La desviación estándar de los ángulos de dispersión estimada en la lámina dispersora mostró valores que variaban entre  $STDV = 5,57$  (para  $E = 6 \text{ MeV}$ ) y  $10,36$  (para  $E = 18 \text{ MeV}$ ). Pudo comprobarse además que el filtro aplanador es el componente que muestra los menores valores de desviación y que los mayores valores de desviación fueron determinados para el haz de electrones con energía  $E = 18 \text{ MeV}$ . Se verificó además que las dosis de radiación de fuga mas elevada fue generada por el sistema colimador del LINAC.

Al realizar los análisis estadísticos, empleando para ello estadística inferencial, se confirmó la existencia de cantidades considerables de partículas que dispersaban con valores ajustados a la condición  $\theta_i \geq \theta_{med}$ . Respecto a la energía se verificó estadísticamente que un elevado porcentaje de los electrones (64 %) se dispersaban con energías comprendidas en el rango  $0 \leq E \leq E_{med}$  y el 35 % lo hicieron con energías pertenecientes al rango  $E \geq E_{med}$ .

Al estudiar la energía de los fotones dispersados se observó en la totalidad de los casos que el 35 % de la energía de dichas partículas era mayor que los valores medios estimados. Se observó además que la probabilidad de obtener dispersión de energías en el rango  $0 \leq E \leq E_{med}$  disminuía al aumentar el valor nominal de la energía  $E$ . Se observó el incremento constante de la desviación estándar para los tres valores de la energía en todos los componentes del LINAC demostrándose la dispersión del haz de partículas en los tres casos estudiados. Los valores medios de la energía de los fotones detectados fueron menores que los observados en el caso de los electrones de manera general.

Dadas las características del programa de simulación empleado en el presente estudio, fue

posible detectar positrones en el procedimiento de simulación. Aunque el estudio está orientado al estudio de la dispersión de electrones y fotones principalmente, se obtuvieron resultados que indican que también hay generación de positrones. Los resultados obtenidos permitieron detectar la producción de positrones y la relación existente entre la energía inicial del haz de los electrones y la alta densidad de los materiales que componen el sistema colimador. Los resultados obtenidos muestran que al aumentar la energía del haz aumenta su generación haciéndose máxima para el máximo valor de la energía  $E_{max}$ .

Se confirmó la utilidad de las técnicas estadísticas en la estimación de los parámetros estadísticos clave. La distribución estadística normal empleada en la determinación de los intervalos de elevada radiación de fuga es bien conocida y sencilla de usar y los resultados obtenidos confirmaron que las partículas bajo estudio experimentaban trayectorias que podían alejarse considerablemente de las dirigidas según la dirección fuente-isocentro, incluso fueron detectadas partículas emitidas por el cabezal que seguían trayectorias de retrodispersión. Pudo observarse que la dispersión de partículas se incrementaba en algunos componentes particulares del LINAC tales como la lámina dispersora, el filtro y el sistema colimador al compararla con la producida por los demás componentes.

La existencia de estos valores de dispersión en el cabezal del LINAC podrían ser indicadores de la elevada cantidad de radiación presente en los sitios donde se realizan los tratamientos. Los resultados obtenidos indican que podría ser necesario reforzar el blindaje en la porción del cabezal donde se ubica el sistema colimador de modo de evitar la fuga de radiación. El método expuesto permitió identificar las principales fuentes de radiación de fuga y las características principales de dicha radiación así como el tipo de radiación emitida en cada componente.

## 5. Referencias

- [1] H. R. Baghani and B. Aminafshar, "In-field radiation contamination during intraoperative electron radiation therapy with a dedicated accelerator," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 155, p. 108918, 2020.

- [2] H. R. Baghani, S. R. Hosseini, M. Robatjazi, and S. Rabi, "Monte Carlo-based determination of radiation leakage dose around a dedicated IOERT accelerator," *Radiation and Environmental Biophysics*, vol. 58, pp. 263–276, 2019.
- [3] A. Ghasemi and H. Ghiasi, "Application of the phase-space distribution approach of Monte Carlo for radiation contamination dose estimation from the  $(n, \sigma)$ ,  $(\sigma, n)$  nuclear reactions and linac leakage photons in the megavoltage radiotherapy facility," *Reports of Practical Oncology and Radiotherapy*, vol. 25, no. 2, pp. 233–240, 2020.
- [4] A. Jaradat and P. Biggs, "Measurement of the neutron leakage from a dedicated intraoperative radiation therapy electron linear accelerator and a conventional linear accelerator for 9, 12, 15 16 and 18 (20) MeV electron energies," *Med. Phys.*, vol. 35, no. 5, pp. 1711–7, 2008.
- [5] E. Woudstra, E., H. Huijzen, and J. van de Poel, "Possible leakage radiation during malfunctioning of Sagittaire accelerator," *Radiotherapy and Oncology*, vol. 29, no. 1, pp. 39–44, 1993.
- [6] M. Qutub, R. Hugtenburg, and I. Al-Affan, "Determination of the photon spectrum of a therapeutic linear accelerator near the maze entrance: Comparison of Monte Carlo modeling and measurements using scintillation detectors corrected for pulse pile-up," *Med. Phys.*, vol. 47, no. 9, pp. 4522–4530, 2017.
- [7] S. Taneja, J. R. Teruel, L. Hu, J. Xue, and D. Barbee, "Use of a 2-Dimensional Ionization Chamber Array to Measure Head Leakage of a Varian Truebeam @Linear Accelerator," *International Journal of Medical Physics, Clinical Engineering and Radiation Oncology*, vol. 9, no. 3, pp. 87–95, 2020.
- [8] P. Taylor, J. Rodgers, and J. Shobe, "Scatter fractions from linear accelerators with x-ray energies from 6 to 24 MV," *Med. Phys.*, vol. 26, no. 8, pp. 1442–1446, 1998.
- [9] J. Shobe, J. E. Rodgers, and P. L. Taylor, "Scattered fractions of dose from 6,10,18, and 25 MV linear accelerator x rays in radiotherapy facilities," *Health Phys.*, vol. 76, no. 1, pp. 27–35, 1999.
- [10] R. Keys and J. Purdy, "Radiation leakage from LINAC electron applicator assembly," *International Journal of Radiation Oncology \*Biology\*Physics*, vol. 10, no. 5, pp. 713–721, 1984.
- [11] D. Granero, J. Perez-Calatayud, F. Ballester, and Z. Ouhib, "Radiation leakage study for the Valencia applicators," *Physica medica*, vol. 29, no. 1, pp. 60–4, 2013.
- [12] J. Lárraga-Gutiérrez, O. Galván de la Cruz, O. García-Garduño, and P. Ballesteros-Zebadúa, "Comparative analysis of several detectors for the measurement of radiation transmission and leakage from a multileaf collimator," *Physica Medica*, vol. 30, no. 3, pp. 391–395, 2014.
- [13] A. Ilias, I. Diallo, and J. Bezin, "Modeling in the leakage radiation of a medical linear accelerator a function of the collimator opening: analytical extrapolation of the leak field opened by a method semi-empirical based measurement at zero field," *Abstracts of the SFPM Annual Meeting / Physica Medica*, vol. 29, no. 1, pp. e1–e46, 2013.
- [14] F. Salvat and J. M. Fernández-Varea, *PENELOPE: A code system for Monte Carlo simulation of electron and photon transport*. Paris: OECD Publishing, 2006.
- [15] J. Sempau, A. Sánchez-Reyes, F. Salvat, H. Oulad ben Tahar, S. B. Jiang, and J. M. Fernández-Varea, "Monte Carlo simulation of electron beams from an accelerator head using PENELOPE," *Physics in Medicine and Biology*, vol. 46, no. 4, pp. 1163–1186, 2001.
- [16] B. Faddegon, J. Perl, and M. Asai, "Monte Carlo simulation of large electron fields," *Physics in Medicine & Biology*, vol. 53, no. 5, pp. 1497–1510, 2008.
- [17] S. García-Pareja, "Análisis físico del acelerador lineal de electrones Siemens Mevatron KDS mediante simulación Monte Carlo con PENELOPE," Trabajo de Investigación Tutelada, Universidad de Granada, España, 2004.
- [18] J. Deng, S. Jiang, T. Pawlicki, J. Li, and C. M. Ma, "Derivation of electron and photon energy spectra from electron beam central axis depth dose curves," *Phys Med Biol.*, vol. 46, no. 5, pp. 1429–1449, 2001.