

ESTUDIO ANALÍTICO Y POR SIMULACIÓN MONTE CARLO DE LA INFLUENCIA DE CAMPOS MAGNÉTICOS INTENSOS EN LA TRAYECTORIA DE ELECTRONES CON ENERGÍAS TÍPICAS DE RADIOTERAPIA *MRI-LINAC*

ANALYTICAL AND MONTE CARLO SIMULATION STUDY OF THE INFLUENCE OF STRONG MAGNETIC FIELDS ON THE PATH OF ELECTRONS WITH ENERGY TYPICAL OF *MRI-LINAC* RADIOTHERAPY

A. Gayol^{*1,2} y M. Valente^{**1,2,3}

¹*Instituto de Física Enrique Gaviola, CONICET, FAMAF, UNC, Córdoba, 5000, Argentina.*

²*Laboratorio de Investigaciones e Instrumentación en Física Aplicada a la Medicina e Imágenes por Rayos X - LIIFAMIR[®], FAMAF, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, 5000, Argentina.*

³*Centro de Física e Ingeniería en Medicina CFIM & Depto. de Ciencias Físicas, Universidad de la Frontera, Temuco, 4780000, Chile.*

Recibido: 05/07/2021; Aceptado: 17/12/2021

El transporte y colisión de radiación puede describirse tanto por métodos analíticos como numéricos. El formalismo estándar de Boltzmann derivado de la mecánica estadística requiere reformulaciones específicas para contemplar la interacción con campos electromagnéticos externos. La verificación de la correcta implementación del acoplamiento con campos electromagnéticos externos en códigos de simulación Monte Carlo es de particular relevancia para confirmar la viabilidad del uso de esta herramienta para describir aplicaciones complejas como radioterapia guiada por imágenes integrando escáner de resonancia magnética al campo radiante de radiación ionizante con los consecuentes efectos dosimétricos.

El presente trabajo reporta sobre la factibilidad y fiabilidad de los códigos Monte Carlo FLUKA y PENELOPE para describir la trayectoria de electrones implementando el acoplamiento con campos magnéticos intensos. Los resultados obtenidos confirman la capacidad de FLUKA y PENELOPE para modelar las alteraciones en las trayectorias de electrones por efecto de campo magnético externo, demostrando además un excelente acuerdo entre ambos códigos y con el modelo teórico-analítico utilizado.


Palabras Clave: IGRT, campos magnéticos, simulaciones Monte Carlo.

Both analytical and numerical methods have proven to be suitable for describing radiation transport and interactions. The standard Boltzmann formalism derived from statistical mechanics requires to be specifically re-formulated to account for the interactions with external electromagnetic fields. Verifying the proper implementation of the external electromagnetic field coupling in Monte Carlo simulation codes is a key issue to confirm the feasibility of using such a tool to describe complex applications like image-guided radiotherapy based on integrating magnetic resonance scanner to the radiant field of ionizing radiation along with the subsequent dosimetric effects.

The present work reports on the feasibility and reliability of the Monte Carlo FLUKA and PENELOPE main codes to assess electron trajectory in presence of strong magnetic fields. The obtained results confirm the ability of FLUKA and PENELOPE to model the alterations in the electron trajectories due to external magnetic field effects, also demonstrating an excellent agreement between both codes and with the theoretical-analytical model.

Keywords: IGRT, magnetic fields, Monte Carlo simulation.

<https://doi.org/10.31527/analesafa.2022.33.1.6>

 ISSN 1850-1168 (online)

I. INTRODUCCIÓN

La reciente incorporación de sistemas de imágenes por resonancia magnética (*MRI*) en los procedimientos terapéuticos con haces de fotones de megavoltaje producidos por aceleradores lineales de uso clínico (*LINAC*) representa un nuevo tipo de tecnología que ha generado grandes expectativas futuras, ya que permite la guía del tratamiento mediante imágenes *in situ* del paciente para la radioterapia de alta precisión [1]. Estos dispositivos, denominados *MRI-LINAC* por una de las principales empresas manufactureras de ace-

leradores de uso clínico, Elekta[®], ofrecen una mejora en la resolución temporal y en la visualización dinámica de la anatomía del paciente durante el tratamiento. De este modo, es posible implementar compensaciones por movimientos, una planificación adaptativa en tiempo real, y potencialmente, una intensificación del tratamiento [2].

La utilización del *MRI-LINAC* puede modificar el depósito de dosis en el paciente respecto a las técnicas convencionales de radioterapia [3], ya que el funcionamiento del dispositivo terapéutico está basado en el uso de campos magnéticos intensos, los que podrían alterar el campo de radiación ionizante. Las trayectorias de electrones secundarios, y de partículas cargadas en general, son alteradas por acción

* amielgayol@gmail.com

** mauro.valente@gmail.com

de la fuerza de Lorentz, pudiendo causar variaciones locales en la dosis [4]. Por tanto, en este tipo de dispositivos híbridos de tratamiento guiado por imágenes debe tenerse en cuenta ciertas consideraciones, tales como la interacción de los electrones secundarios con el intenso campo magnético que produce el imán para adquirir imágenes por resonancia magnética [5]. El estudio del efecto en el transporte de partículas cargadas acopladas a campos magnéticos externos puede abordarse, en líneas generales por medio de modelos teórico-analíticos, caracterizaciones experimentales en caso de contar con sistemas dosimétricos apropiados y, alternativa y/o complementariamente por medio de modelado computacional con herramientas previamente convalidadas para este tipo de aplicaciones.

Por su parte, las simulaciones Monte Carlo son un conjunto de algoritmos matemáticos computacionalmente implementados que permiten el modelado de sistemas estocásticos mediante la utilización de números aleatorios [6]. Las técnicas numéricas basadas en el método Monte Carlo han probado ser una excelente herramienta para resolver numéricamente integrales definidas, y por lo tanto, se ha extendido su aplicación al modelado del transporte de radiación bajo el formalismo de Boltzmann [7], a partir de reformular la ecuación principal de Boltzmann en términos puramente de integrales definidas. En particular, los códigos de simulación Monte Carlo, FLUKA [8-10] y PENELOPE [11, 12], han sido largamente validados en aplicaciones de física atómica, de radiaciones y médica, demostrando una gran capacidad y precisión para el modelado del transporte de radiación ionizante en diferentes materiales, incluyendo la versatilidad de incorporar campos electromagnéticos a través de rutinas definidas por el usuario. De este modo, es posible calcular la trayectoria de las partículas cargadas considerando los efectos producidos por campos magnéticos, similares a los utilizados en la técnica de *MRI-LINAC*.

Existen varios trabajos recientes que reportan estudios sobre las alteraciones dosimétricas producidas por la presencia de intensos campos magnéticos. A. J. Raaijmakers et. al., por ejemplo, han estudiado el impacto en la dosis debido a las alteraciones de la trayectoria de los electrones producto de la presencia de campos magnéticos intensos, utilizando abordajes experimentales y por simulaciones Monte Carlo con el código Geant4 [13]. Por otro lado, el trabajo de R. G. Figueroa et. al. reporta sobre el cálculo analítico del radio de curvatura y los ángulos de deflexión de haces de electrones emitidos por un LINAC, sometidos a imanes permanentes de alta intensidad, utilizando un modelo teórico electrodinámico con consideraciones relativistas, comparando posteriormente estos resultados con valores obtenidos mediante simulaciones Monte Carlo con el código FLUKA [14].

En este contexto, uno de los principales objetivos del presente trabajo, es calcular por medio de una aproximación teórica y mediante simulaciones Monte Carlo con los códigos FLUKA (versión 2020.0.6) y PENELOPE (versión 2008), el radio de curvatura en la trayectoria de electrones con energías similares a las presentes en el campo de la radioterapia, sometidos a la presencia de un campo magnético intenso, comparable al campo necesario para obtener

imágenes por resonancia magnética. Asimismo, se presenta una comparación exhaustiva entre los códigos de simulación implementados, evaluando su capacidad de modelar los efectos de los campos magnéticos intensos utilizados en la técnica de *MRI-LINAC*.

II. MÉTODOS Y MATERIALES

Configuración de estudio

Con el propósito de cuantificar la alteración en la trayectoria de los electrones ocasionada por la presencia de campo magnético, así como también realizar una comparación entre los diferentes códigos de simulación utilizados, se estudió el caso de haces de electrones propagándose en el vacío en presencia de campo magnético constante, con el objetivo de atribuir las alteraciones única y exclusivamente al efecto de acoplamiento con el campo magnético externo. Los valores de energía cinética (E) utilizados para el haz de partículas fueron 0.5 MeV, 1.0 MeV, y 6.0 MeV. Intensidades de campo magnético (B) de 0.25 T, 0.50 T, 1.0 T, 1.50 T y 2.0 T fueron empleadas con cada energía reportada.

Se remarca que los valores considerados para dichos parámetros representan valores característicos de radioterapia y de *MRI*, respectivamente.

Las magnitudes típicas de campos magnéticos aplicadas en los tratamientos con *MRI-LINAC* son 0.5 T y 1.5 T [15, 16]. Dado que en el presente trabajo se busca examinar la influencia de B en el radio de curvatura de la trayectoria de los electrones, siguiendo una metodología similar a la utilizada por Raaijmakers et. al. en estudios previos [17], se optó por cubrir un amplio rango de intensidades, teniendo en cuenta los valores de B mencionados anteriormente.

Por otro lado, se decidió utilizar los valores de E reportados, dado que 6 MV es el potencial acelerador del haz típicamente propuesto para el dispositivo de radioterapia [18], y por lo tanto, la máxima energía cinética que los electrones pueden alcanzar es de 6 MeV; mientras que 0.5 MeV y 1 MeV son valores representativos dentro del espectro de electrones secundarios producidos por los fotones incidentes.

Mediante la interfaz gráfica *Flair* [19] se llevaron a cabo las simulaciones en FLUKA. Utilizando las cartas *BEAM*, *BEAMPOS* y *MGNFIELD* presentes en la misma, se fijaron los parámetros necesarios para representar un haz monoenergético y filiforme de electrones propagándose en la dirección \hat{k} , correspondiendo a la dirección creciente del eje Z , dentro de una región con un campo magnético constante en la dirección \hat{i} , correspondiendo a la dirección creciente del eje X . La incorporación del campo magnético en la simulación del proceso de irradiación se implementó por medio de la carta *MGNFIELD*, utilizando un *STEPSIZE* de 0.1 mm, y la definición de las propiedades del campo en un *file* externo producido por el usuario, donde se especificó tanto la intensidad y la dirección del campo en cada coordenada del *set-up* diseñado, como indica esquemáticamente la Fig. 1.

Mediante la incorporación del archivo a la interfaz de trabajo, se creó un programa ejecutable para poner en funcionamiento la simulación considerando la presencia del campo magnético.

En cuanto a PENELOPE, utilizando el archivo *traject.in* distribución de PENELOPE v. 2008, se llevaron a cabo las simulaciones del transporte de partículas cargadas en vacío con presencia de campo magnético. Los valores de la dirección e intensidad del campo, energía y tipo de partícula, así como también de la dirección inicial del haz de radiación, se fijaron en acuerdo con las disposiciones del *set-up* diseñado, descrito anteriormente para el caso de FLUKA. Los demás parámetros presentes en *traject.in* se establecieron considerando las recomendaciones del archivo *penfield.f*, también incluido en el paquete de distribución del código PENELOPE v. 2008.

En ambos códigos, la cantidad de partículas primarias fue tal que las incertidumbres estadísticas resultaran menores al 2%.

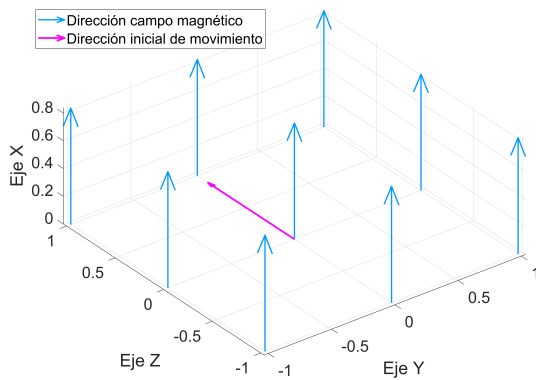


FIG. 1: Esquema simplificado del *set-up* diseñado para los estudios con simulación Monte Carlo de la alteración en la trayectoria de electrones por presencia de campo magnético externo.

Procesamiento de datos y tratamiento de incertezas

En ambos códigos se llevó registro de la trayectoria de los electrones, generando un archivo como *output* de cada simulación en el que se guardó el valor de las coordenadas cartesianas de las partículas en cada uno de los pasos (*STEP*) del proceso de transporte. Los archivos de *output* conteniendo los resultados fueron procesados por medio de un programa, en plataforma MatLab, de desarrollo propio. Se implementó una metodología original para determinar finalmente en cada caso de estudio el radio de curvatura R_F y R_P para FLUKA y PENELOPE, respectivamente. La misma, se basó en el ajuste de la ecuación de una circunferencia a las trayectorias correspondientes, tal como se reporta esquemáticamente en la Fig. 2 para el caso de energía cinética de 6 MeV.

Dado que R_F y R_P fueron determinados directamente sobre la trayectoria de los electrones, la incerteza asociada se estimó en términos del tamaño de píxel, Δp , lo que da cuenta de la resolución espacial del mapeo realizado por la simulación. FLUKA permite determinar la longitud y el número de subdivisiones de la región con campo magnético, L y N respectivamente, de modo que Δp_{FLUKA} queda determinado por la expresión (1). En cuanto a PENELOPE, como la longitud de cada tramo de la trayectoria se calcula mediante subrutinas específicas del código que hacen uso de E y la dirección inicial, se determinó $\Delta p_{PENELOPE}$ según la dis-

tancia Euclídea, correspondiente a la expresión (2). En ella, los subíndices j y $j+1$ refieren a la posición actual e inmediatamente posterior de la partícula para el j -ésimo camino libre, respectivamente.

$$\Delta p_{FLUKA} = \frac{L}{N} = \sigma_{R_F} \quad (1)$$

$$\Delta p_{PENELOPE} = \sqrt{(x_{j+1} - x_j)^2 + (y_{j+1} - y_j)^2 + (z_{j+1} - z_j)^2} = \sigma_{R_P} \quad (2)$$

Por otro lado, acorde a la expresión (3), y haciendo uso de los valores de E y B reportados previamente, se calcularon los valores teóricos para el radio de curvatura en cada caso (R_r). Dicha expresión analítica fue derivada por R. G. Figueroa et. al. [14], considerando un enfoque puramente relativista. En ella, m y e refieren respectivamente a la masa en reposo y a la carga del electrón; c a la velocidad de la luz en el vacío; E_0 a la energía en reposo del electrón y γ al factor de Lorentz, dado por la expresión (4), en donde v representa la velocidad del electrón.

$$R_r = \gamma \frac{mc^2}{eB} \sqrt{1 - \frac{1}{(1 + \frac{E}{E_0})^2}} \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (4)$$

Asumiendo a E y B como fuentes de incerteza de la aproximación teórica, se determinó su incertidumbre mediante teoría de propagación de errores. En el caso de la energía, en base a la información reportada por trabajos previos del espectro energético típicamente presente en los dispositivos de *MRI-LINAC* [18], se consideró, a modo de ejemplo, una variación de 3%, que resulta representativa de las incertezas en sistemas de detección espectroscópicos como detector de Germanio ultrapuro enfriado por nitrógeno líquido, como el modelo GL1010 de CANBERRA, capaz de realizar determinaciones experimentales [20] de espectros de alta energía en rangos comparables a las energías producidas en el *LINAC*. En relación al campo magnético, se consideró a la homogeneidad/uniformidad como la fuente de incertezas, valor que asciende a 4 ppm, aproximadamente, para el campo en los dispositivos *MRI* de 1.5 T acoplados a *LINACs* Elekta, utilizados comúnmente en los prototipos *MRI-LINAC* para radioterapia [21].

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

La Tabla 1 resume los principales resultados obtenidos para el radio de curvatura en función de los valores de energía cinética e intensidad de campo magnético utilizados, provenientes tanto de los ajustes a las trayectorias logrados por simulaciones Monte Carlo, como de la aproximación teórica.

Se observa que, dada una energía, el valor del radio decrece a medida que B aumenta. Este resultado se muestra de acuerdo con las leyes del electromagnetismo; y en el contexto del presente trabajo es de notar que la intensidad del campo magnético externo del escáner de resonancia magné-

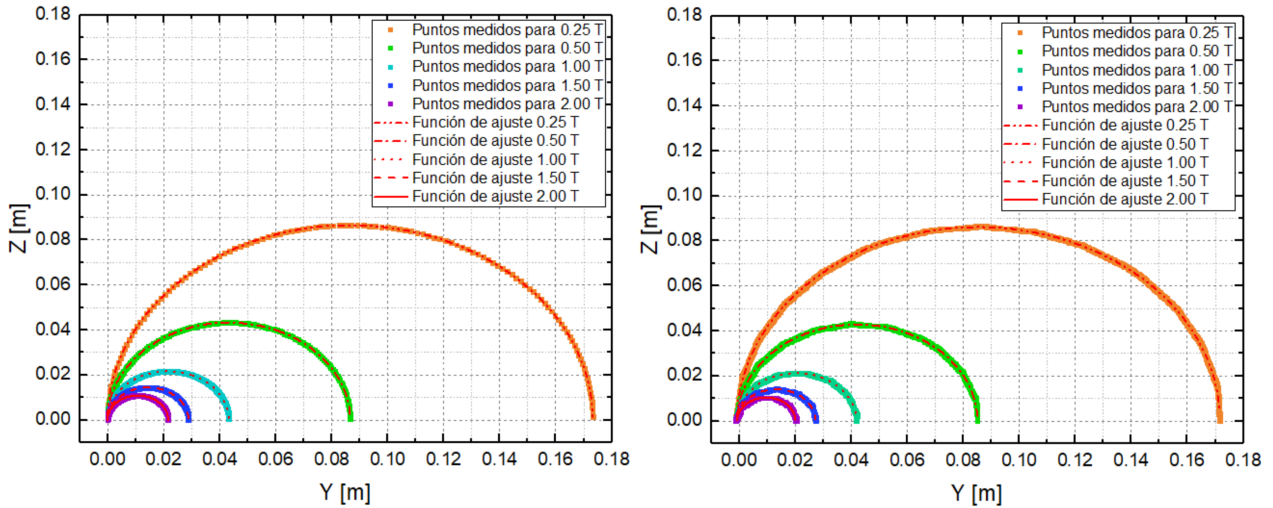


FIG. 2: Esquema representando la metodología para el ajuste de la trayectoria de electrones de 6 MeV para determinar el radio de curvatura, utilizando los resultados proporcionados por PENELOPE (izquierda) y FLUKA (derecha).

TABLA 1: Valores del radio de curvatura de la trayectoria de los electrones en vacío con presencia de campo magnético constante.

E [MeV]	B [T]	R_P [cm]	R_F [cm]	R_r [cm]
0.5	0.25	1.16 ± 0.03	1.14 ± 0.01	1.16 ± 0.02
0.5	0.50	0.58 ± 0.01	0.56 ± 0.01	0.58 ± 0.01
0.5	1.00	0.291 ± 0.007	0.28 ± 0.01	0.291 ± 0.005
0.5	1.50	0.194 ± 0.005	0.19 ± 0.01	0.194 ± 0.003
0.5	2.00	0.146 ± 0.004	0.14 ± 0.01	0.146 ± 0.002
1.0	0.25	1.90 ± 0.05	1.88 ± 0.01	1.90 ± 0.03
1.0	0.50	0.95 ± 0.02	0.93 ± 0.01	0.95 ± 0.02
1.0	1.00	0.47 ± 0.01	0.45 ± 0.01	0.474 ± 0.008
1.0	1.50	0.316 ± 0.008	0.31 ± 0.01	0.316 ± 0.005
1.0	2.00	0.237 ± 0.006	0.23 ± 0.01	0.237 ± 0.004
6.0	0.25	8.7 ± 0.2	8.64 ± 0.03	8.7 ± 0.2
6.0	0.50	4.3 ± 0.1	4.31 ± 0.03	4.33 ± 0.08
6.0	1.00	2.17 ± 0.05	2.15 ± 0.03	2.17 ± 0.04
6.0	1.50	1.44 ± 0.04	1.44 ± 0.03	1.44 ± 0.03
6.0	2.00	1.08 ± 0.03	1.07 ± 0.03	1.08 ± 0.02

tica, tiene un impacto directo en el efecto sobre las trayectorias de los electrones, y partículas cargadas en general. Por otro lado, dada una intensidad de campo, el radio de curvatura aumenta junto con la energía cinética de los electrones. Este resultado también se muestra de acuerdo con las leyes del electromagnetismo, y en el contexto del presente trabajo cabe mencionar que la alteración relativa de las trayectorias de electrones, o partículas cargadas en general, se presentará más intenso para energías cinéticas menores. Considerando que el radio de curvatura es una magnitud geométrica que coincide con el inverso del valor absoluto de la curvatura en cada punto [22], se concluye que fijando un valor de E , la deflexión en la trayectoria de los electrones es más pronunciada para intensidades elevadas del campo magnético, mientras que para un valor fijo de campo magnético, la trayectoria se ve cada vez menos perturbada al aumentar la energía cinética de las partículas cargadas.

También puede apreciarse a partir de la Tabla 1 que los valores obtenidos para R_F y R_P son comparativamente indistinguibles. Esta comparación demuestra una equivalencia entre los resultados provistos por lo dos códigos de si-

mulación utilizados. Asimismo, se confirma la capacidad de los mismos de incorporar la presencia de campos magnéticos en el estudio del transporte de radiación en vacío.

Por otro lado, puede también inferirse a partir de la Fig. 3, que se obtuvo un excelente acuerdo entre la formulación relativista para el radio de curvatura, y los valores obtenidos mediante FLUKA y PENELOPE. Se remarca así la necesidad de un modelo analítico con un abordaje relativista, para los valores de energía utilizados en el presente estudio, típicos en el ámbito de la radioterapia en general. La concordancia entre los valores del radio obtenido analíticamente con las simulaciones, constituye una prueba de sostén para la viabilidad y confiabilidad de ambos códigos para modelar el transporte de radiación en presencia de campos magnéticos intensos, al menos en vacío.

Por último, a modo de verificación externa de la metodología desarrollada, se consideró como referencia para comparación, el valor del radio para el caso de un haz de electrones de 6 MeV sometido a un campo magnético de 0.9 T, logrado con FLUKA y reportado por R. G. Figueroa et al. [14]. Los resultados de la comparación se reportan en la

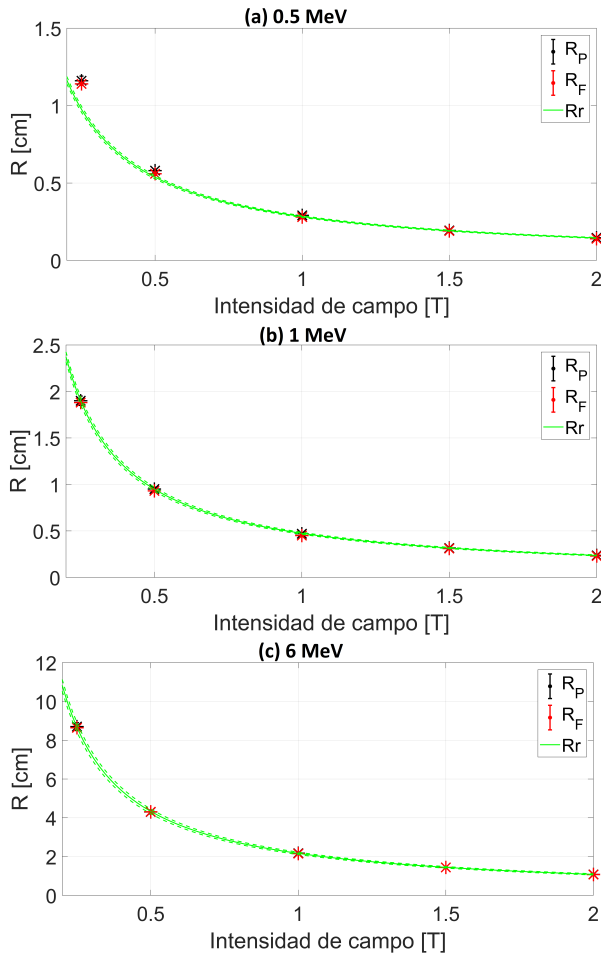


FIG. 3: Dependencia del radio de curvatura con la intensidad del campo magnético (para energía cinética constante) comparando con modelos analíticos, junto a sus correspondientes incertidumbres. Energía de 0.5 MeV (a), energía de 1.0 MeV (b) y energía de 6.0 MeV (c).

Tabla 2.

TABLA 2: Radio de curvatura de la trayectoria de un haz de electrones de 6 MeV sometido a un campo magnético de 0.9 T, lograda por R. G. Figueroa et. al. obtenido con FLUKA (columna 1) y con la metodología propia desarrollada (columnas 2 y 3).

Valor reportado por R. G. Figueroa et. al. [cm]	R_p [cm]	R_r [cm]
2.4 ± 0.1	2.41 ± 0.06	2.41 ± 0.04

IV. CONCLUSIONES

Se desarrollaron dos herramientas independientes de simulación Monte Carlo adaptando subrutinas de los códigos FLUKA y PENELOPE, capaces de determinar alteraciones en la trayectoria de electrones, y que pueden extenderse a partículas cargadas en general, en presencia de campos magnéticos intensos. En base a las herramientas de simulación desarrolladas, se modeló el efecto de campos magnéticos intensos sobre la trayectoria de electrones con energía cinética dentro del rango de interés para la radioterapia, logrando reproducir condiciones generales similares a las presentes en los tratamientos de radioterapia guiada por imágenes con los dispositivos de *MRI-LINAC*.

Además, se propuso, desarrolló e implementó una me-

todología para estimar el radio de curvatura a partir de la trayectoria de los electrones, y de partículas cargadas en general, obtenidas de las simulaciones Monte Carlo; así como un modelo para el tratamiento de las incertezas asociadas.

Por otro lado, se utilizó un modelo analítico reportado en literatura para describir el radio de curvatura, considerando una aproximación relativista.

Los resultados obtenidos confirman que la curvatura de la trayectoria de los electrones, y de las partículas cargadas en general, depende fuertemente de la intensidad del campo magnético al que están sometidos, así como también de la energía cinética que poseen.

Al comparar los valores del radio de curvatura logrados mediante simulaciones Monte Carlo, y la posterior metodología de tratamiento de datos e incertezas, con la formulación teórica, se confirmó la conveniencia de un enfoque relativista dentro del rango energético comúnmente utilizado en radioterapia.

Se realizó una evaluación comparativa preliminar entre los códigos de simulación utilizados obteniendo resultados por demás satisfactorios en términos del excelente acuerdo, basado en la indistinguibilidad de los resultados, entre ambos códigos. Asimismo, se confirmó la viabilidad y robustez de éstos para incorporar y modelar el efecto de los intensos campos magnéticos.

Por último, cabe destacar que debido al hecho de que los electrones, radiación directamente ionizante, intervienen de manera significativa en el depósito de dosis en radioterapia, la información reportada en el presente estudio sobre su comportamiento bajo la influencia de campos magnéticos similares a los utilizados en la técnica de *MRI-LINAC*, se da cuenta de la relevancia derivada de la presencia de campos magnéticos intensos en cuanto a los potenciales cambios dosimétricos al implementarse esta tecnología *MRI-LINAC*, así como también la relevancia y creciente necesidad de estudio de dicho proceso.

REFERENCIAS

- [1] R. Tjissen, M. Philippens, E. Paulson, M. G. M. B. Chugh, A. Wetscherek, M. Dubec, J. Wang y U. van der Heide. MRI commissioning of 1.5T MR-linac systems - a multi-institutional study. *Radiother. Oncol.* **132**, 114-120 (2019).
- [2] B. W. Raaymakers, J. J. W. Lagendijk, J. Overweg, J. G. M. Kok, A. J. E. Raaijmakers, E. M. Kerkhof, R. W. van der Put, I. Meijssing, S. P. M. Crijs, F. Benedosso, M. van Vulpen, C. H. W. de Graaff, J. Allen y K. J. Brown. Integrating a 1.5 T MRI scanner with a 6 MV accelerator: proof of concept. *Phys. Med. Biol.* **54**, 229-237 (2009).
- [3] J. Lagendijk, B. Raaymakers, A. Raaijmakers, J. Overweg, K. Brown, E. Kerkhof, R. van der Put, B. Hardemark, M. van Vulpen y U. van der Heide. MRI/LINAC integration. *Radiother. Oncol.* **86**, 25-29 (2008).
- [4] H. Bainbridge, M. Menten, M. Fast, S. Nill, U. Oelfke y F. McDonald. Treating locally advanced lung cancer with a 1.5 T MR-Linac - Effects of the magnetic field and irradiation geometry on conventionally fractionated and isotoxic dose-escalated radiotherapy. *Radiother. Oncol.* **129**, 280-285 (2017).

- [5] S. L. Hackett, B. van Asselen, J. W. H. Wolthaus, J. J. Bluemink, K. Ishakoglu, J. Kok, J. J. W. Lagendijk y B. W. Raaijmakers. Spiraling contaminant electrons increase doses to surfaces outside the photon beam of an MRI-linac with a perpendicular magnetic field. *Phys. Med. Biol.* **63**, 095001 (2018).
- [6] K. Sickafus, E. Kotomin y B. Uberuaga. *Radiation Effects in Solids* (NATO Science Series, 2007).
- [7] J. S. Aubin, A. Keyvanloo, O. Vassiliev y B. G. Falloene. A deterministic solution of the first order linear Boltzmann transport equation in the presence of external magnetic fields. *Medical Physics* **42**, 780-793 (2015).
- [8] G. Battistoni, T. Boehlen, F. Cerutti, P. W. Chin, L. S. Esposito, A. Fassò, A. Ferrari, A. Lechner, A. Empl, A. Mairani, A. Mereghetti, P. G. Ortega, J. Ranft, S. Roesler, P. R. Sala, V. Vlachoudis y G. Smirnov. Overview of the FLUKA code. *Annals of Nuclear Energy* **82**, 10-18 (2015).
- [9] T. Böhlen, F. Cerutti, M. Chin, A. Fassò, A. Ferrari, P. Ortega, A. Mairani, P. Sala, G. Smirnov y V. Vlachoudis. The FLUKA Code: Developments and Challenges for High Energy and Medical Applications. *Nuclear Data Sheets* **120**, 211-214 (2014).
- [10] Battistoni, Giuseppe, J. Bauer, T. Boehlen, F. C. M. P. Chin, R. D. S. Augusto, A. Ferrari, P. G. O. W. Kozłowska, G. Magro, A. Mairani, K. Parodi, P. R. Sala, P. Schoofs, T. Tessonnier y V. Vlachoudis. The FLUKA Code: An Accurate Simulation Tool for Particle Therapy. *Frontiers in Oncology* **6**, 116 (2016).
- [11] J. Baró, J. Sempau, J. Fernández-Varea y F. Salvat. PENELOPE: An algorithm for Monte Carlo simulation of the penetration and energy loss of electrons and positrons in matter. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* **100**, 31-46 (1995).
- [12] F. Salvat, J. M. F. Varea y J. Sempau. *PENELOPE-2008: A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport* (Nuclear Energy Agency, 2008).
- [13] A. J. E. Raaijmakers, B. W. Raaijmakers y J. J. W. Lagendijk. Experimental verification of magnetic field dose effects for the MRI-accelerator. *Phys. Med. Biol.* **52**, 4283-4291 (2007).
- [14] R. G. Figueroa, L. Rojas y M. Valente. Trajectory control of electron beams using high intensity permanent magnets for linac-adaptable convergent beam radiotherapy. *Appl. Radiat. Isot.* **151**, 13-18 (2019).
- [15] I. J. Das, K. P. McGee, N. Tyagi y H. W. H. Role and future of MRI in radiation oncology. *The British journal of radiology* **92**, 20180505 (2019).
- [16] M. Karlsson, M. G. Karlsson, T. Nyholm, C. Amies y Zackrisson. Dedicated magnetic resonance imaging in the radiotherapy clinic. *Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys.* **74**, 644-651 (2009).
- [17] A. J. E. Raaijmakers, B. W. Raaijmakers y J. J. W. Lagendijk. Magnetic-field-induced dose effects in MR-guided radiotherapy systems: dependence on the magnetic field strength. *Phys. Med. Biol.* **53**, 909-923 (2008).
- [18] D. Sheikh-Bagheri y D. W. O. Rogers. Monte Carlo calculation of nine megavoltage photon beam spectra using the BEAM code. *Medical Physics* **29**, 391-402 (2002).
- [19] V. Vlachoudis. *FLAIR: A Powerful But User Friendly Graphical Interface For FLUKA* (Proc. Int. Conf. on Mathematics, Computational Methods & Reactor Physics (M&C), 2009).
- [20] F. Geser, A. Leiva-Genre, R. Figueroa, M. Vázquez, F. Malano, F. Mattea, M. Santibáñez, J. Velásquez y M. Valente. A framework for e+e- annihilation detection using nanoparticles for tumour targeting in radiotherapy. *Journal of Physics Conf. Ser.* **21**, 012060 (2018).
- [21] J. E. Snyder, J. St-Aubin, S. Yaddanapudi, A. Boczkowski, D. Dunkerley, S. A. Graves y D. E. Hyer. Commissioning of a 1.5T Elekta Unity MR-linac: A single institution experience. *J. Appl. Clin. Med. Phys.* **21**, 160-172 (2020).
- [22] M. Spiegel y L. Abellanas. *Fórmulas y Tablas de Matemática Aplicada* (McGraw-Hill, 1988).