

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE FISICA



**PUESTA EN MARCHA DEL ALGORITMO DE HAZ DE LÁPIZ
GAUSSIANO GENERALIZADO PARA TRATAMIENTOS CON
HACES DE ELECTRONES**

Trabajo Especial de Grado presentado por

Carlos Luis González Colmenares

ante la Facultad de Ciencias de la

ilustre Universidad Central de Venezuela

como requisito parcial para optar al título

de: **Licenciado en Física**

Con la tutoría del MSc. Franklyn Reggio.

Enero -2017

Caracas – Venezuela

Escuela de Física

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE FÍSICA



**PUESTA EN MARCHA DEL ALGORITMO DE HAZ DE LÁPIZ GAUSSIANO
GENERALIZADO PARA TRATAMIENTOS CON HACES DE ELECTRONES**

Trabajo Especial de Grado presentado por
Carlos Luis González Colmenares
ante la Facultad de Ciencias de la
ilustre Universidad Central de Venezuela
como requisito parcial para optar al título
de: **Licenciado en Física**
Con la tutoría del MSc. Franklyn Reggio.

Enero -2017

Caracas – Venezuela



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA



VEREDICTO

Quienes suscriben, miembros del Jurado designado por el Consejo de la Escuela de Física de la Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Venezuela, para examinar el Trabajo Especial de Grado presentado por **Carlos Luis González Colmenares**, Cédula de Identidad V-17642775, bajo el título "**Puesta en marcha del algoritmo de Haz de Lápis Gaussiano Generalizado**", a los fines de cumplir con el requisito legal para optar al grado de **Licenciado en Física**, dejan constancia de lo siguiente:

1. Leído como fue dicho trabajo por cada uno de los miembros del Jurado, éste fijó el día 30 de marzo de 2017, a las 9:00 am, para que el autor lo defendiera en forma pública, lo que éste hizo en la Sala de videoconferencias del Centro de Computación, mediante un resumen oral de su contenido, luego de lo cual respondió satisfactoriamente a las preguntas que le fueron formuladas por el jurado; todo ello conforme a los artículos 20, 21, 22, 25, 26 y 28 de la Normativa de Trabajo Especial de Grado de la Licenciatura en Física de la Facultad de Ciencias de la UCV vigente.
2. Finalizada la defensa pública del trabajo, el jurado decidió declararlo aprobado por considerar que se ajusta a lo dispuesto y exigido en la Normativa de Trabajo Especial de Grado de la Licenciatura en Física de la Facultad de Ciencias de la UCV vigente en sus artículos 1, 5 y 6.

Se levanta la presente acta a los 30 días del mes de marzo de 2017, dejándose también constancia de que, conforme a la normativa jurídica vigente, actuó como coordinador del jurado el tutor del Trabajo Especial de Grado Prof. Franklyn José Reggio Gomez.

Firma del jurado evaluador

Prof. José Antonio López Rodríguez
V-10504342
UCV

Dr. Jesús Enrique Dávila Pérez
V-8026322
GURVE



Prof. Franklyn José Reggio Gomez
V-12962577
UCV

A ustedes,

*Porque aunque no entenderían la forma,
nadie podría disfrutar más el trasfondo*

*... y porque la deuda
necesitaba ser saldada.*

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y mi abuela, porque sus ideales en cuanto a mi formación académica resuenan en mi mente y me regresan al sendero sin darme cuenta.

A mis familiares, a todos los que están, a los que ya no están y a los que vienen... por la ayuda, el apoyo, por el cariño y por creer.

A mis compañeros de la Universidad Central de Venezuela, mis compañeros pasantes de GURVE, y mis amigos, por estar, por sus palabras y consejos, por su determinación y su talento que muchas veces arrastra y levanta. Gracias por ayudar sin pensarlo y por competir sin limitarse. También agradezco por todos los momentos de risas y de estrés compartido.

A mi tutor Franklyn Reggio por guiarme, por su apoyo, su dedicación y sobre todo su paciencia. Agradecido por todo el conocimiento, el profesionalismo y la amistad brindada.

Al Servicio de Radioterapia del Hospital de Clínicas Caracas por facilitar los equipos utilizados para la realización de este trabajo. Agradezco especialmente a Juan Carlos Fuentes, Técnico de Radioterapia, por su disposición a colaborar y por su ayuda incondicional en la elaboración de todos los insertos utilizados en el presente trabajo.

A todos los profesores que fueron parte, y ayudaron a crear el camino que me condujo hasta este punto y lo que falta...

RESUMEN

Se tomaron los datos referentes a factores de salida para haces de electrones del acelerador lineal modelo Trilogy del Servicio de Radioterapia del Hospital de Clínicas Caracas, para todos los aplicadores disponibles y tamaños de campo cuadrados desde 2x2 hasta 25x25 cm² (según el aplicador). Además se calcularon los valores de Distancia Fuente Superficie Efectiva (SSD_{eff}) para todas las energías disponibles del acelerador, para cada aplicador y se procedió a introducir los datos al SPT. Se introdujeron los datos de factores de salida medidos y SSD_{eff} calculados al sistema de planificación de tratamiento (SPT) Eclipse y se procedió a realizar planes de tratamiento de prueba que incluyeron campos rectangulares y cuadrados a diferentes energías así como también distancias fuente superficie (SSD) diferentes a la estándar (100 cm). Los planes fueron calculados por el SPT, calculados puntualmente y medidos dosimétricamente para realizar una comparación entre lo calculado y lo medido.

Palabras clave: Factores de salida, acelerador lineal, aplicadores, distancia fuente superficie, distancia fuente superficie efectiva, sistema de planificación de tratamiento

ÍNDICE GENERAL

Lista de figuras	17
Lista de tablas	21
Introducción.....	25
Capítulo 1	27
Metodología de la investigación	27
1.1 Problema	27
1.2 Justificación	27
1.3 Limitaciones.....	27
1.4 Objetivos.....	27
1.4.1 General.....	27
1.4.2 Específicos.....	28
Capítulo 2	29
Marco Teórico.....	29
2.1 Antecedentes	29
2.2 Generación del haz de electrones.....	30
2.2.1 Sistema de Generación de Radiofrecuencias.....	31
2.2.2 Klystron	32
2.2.3 Sistema de inyección y sistema de aceleración de los electrones.....	33
2.2.4 Estructura aceleradora de onda progresiva	34
2.2.5 Estructura aceleradora de onda estacionaria.....	355
2.2.6 Sistema de desviación del haz de electrones	35

2.2.7	Producción de un haz extenso de electrones	36
2.2.8	Sistema de Control de la Dosis Absorbida (Cámaras Monitoras).....	38
2.2.9	Aplicadores.....	39
2.3	Interacción de los electrones con la materia	40
2.3.1	Pérdidas por Colisión (Ionización y Excitación).....	41
2.3.2	Pérdidas Radiativas (Bremsstrahlung)	42
2.3.3	Polarización	42
2.3.4	Poder de Frenado.....	43
2.3.5	Dispersión electrónica	43
2.4	Detectores	43
2.4.1	Cámaras de Ionización	44
2.4.2	Diodos Semiconductores.....	47
2.5	Formalismo para determinación de dosis absorbida en agua	49
2.5.1	Cámaras de Ionización	49
2.5.2	Maniqués	50
2.5.3	Índice de Calidad de haz	51
2.5.4	Distribuciones de dosis en profundidad en el eje central	52
2.5.5	Determinación de dosis absorbida.....	52
2.6	Algoritmo de Haz de lápiz gaussiano generalizado.....	53
2.6.1	Dispersión lateral, σ	55
2.6.2	Haz de Lápiz Gaussiano Generalizado (GGPB)	56
2.7	Cálculo Manual de Unidades Monitor para tratamientos con haces de electrones	58
2.7.1	Cálculo de Unidades Monitor (MU)	59
2.7.2	Factores de Salida (Se).....	59
2.7.3	Cálculos para una distancia fuente superficie extendida.....	61

2.7.4	Técnica SSD Efectiva (SSD_{eff}).....	61
2.7.5	Técnica de Air-gap	63
Capítulo 3		65
Materiales y Equipos		65
3.1	Acelerador Lineal (LINAC).....	65
3.2	Maniquí	65
3.3	Detectores	66
3.3.1	Cámara de ionización plano-paralela para medidas de electrones.	66
3.3.2	Cámara de ionización para medidas de fotones y electrones.	67
3.3.3	Diodo semiconductor estereotáctico de PTW	67
3.4	Electrómetro.....	68
Capítulo 4		71
Metodología Experimental		71
4.1	Determinar R_{50}	72
4.2	Elección del detector para medir factores de salida.....	74
4.3	Medir Factores de Salida para una energía de 9 MeV	74
4.4	Medir Factores de Salida para el resto de las energías de electrones del acelerador..	75
4.5	Introducir datos de los factores de salida al Sistema de Planificación de Tratamiento. ...	76
4.6	Medir los valores de Distancia fuente superficie efectiva (SSD_{eff})	78
4.7	Introducir datos de SSD_{eff} al Sistema de Planificación de Tratamiento	79
4.8	Comparación de dosis entre SPT, cálculo puntual y dosimetría.....	80

Capítulo 5	83
Resultados	83
5.1 Determinar R_{50}	83
5.2 Elección del detector	84
5.3 Factores de Salida para electrones de 9 MeV	84
5.4 Factores de Salida para electrones de 4, 6, 12, 15 y 18 MeV	91
5.5 Distancia Fuente Superficie Efectiva (SSD_{eff})	94
5.6 Comparación de dosis entre SPT, cálculo puntual y dosimetría	99
 Capítulo 6	 103
Discusión de Resultados.....	103
6.1 Determinar R_{50}	103
6.2 Elección del Detector.....	103
6.3 Factores de Salida	104
6.4 SSD efectiva	106
6.5 Comparación de dosis entre SPT, cálculo puntual y dosimetría	106
 Conclusiones y Recomendaciones	 111
Bibliografía	115
Apéndice A: Factores de Salida	117
Apéndice B: Distancia fuente superficie efectiva (SSD_{eff}).....	133

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1. Sesión de radioterapia en paciente femenino.	29
Figura 2. 2. Acelerador lineal Varian modelo Trilogy.	30
Figura 2. 3. (a) Esquema de un klystron de dos cavidades resonantes. (b) Campo eléctrico alterno.	32
Figura 2. 4. Cañón de electrones tipo tríodo de un Varian Clinac-18.	33
Figura 2. 5. Estructura aceleradora de onda progresiva.	34
Figura 2. 6. Vista transversal de una estructura aceleradora de onda estacionaria de un acelerador lineal de 6 MV.	35
Figura 2. 7. Sistemas de desviación para diferentes modelos de acelerador lineal.	36
Figura 2. 8. Desviaciones de 90° y 270°.	36
Figura 2. 9. La parte izquierda muestra el efecto del uso de dos láminas dispersoras para ensanchar el haz de electrones. La parte derecha muestra el cabezal de un acelerador cuando se selecciona el modo de tratamiento con electrones.	37
Figura 2. 10. Esquema de la división en los distintos sectores de las cámaras de ionización en un acelerador.	39
Figura 2. 11. Efecto de la distancia del aplicador sobre la distribución de dosis absorbida. ...	40
Figura 2. 12. Tasa de pérdida de energía en MeV por g/cm ² como función de la energía de los electrones para agua y plomo.	42
Figura 2. 13. Esquema de una cámara tipo Farmer.	45
Figura 2. 14. Esquema de una cámara plano – paralela.	46
Figura 2. 15. Cámara de ionización plano-paralela modelo PTW.	50
Figura 2. 16. Maniquí de agua para mediciones automáticas de distribución de dosis modelo MP3-M.	50
Figura 3. 1. Cámara de ionización plano paralela modelo ROOS 3401.	66
Figura 3. 2. Cámara de ionización cilíndrica modelo SEMIFLEX 31010.	67
Figura 3. 3. Diodo semiconductor modelo TN 60017.	68
Figura 3. 4. Electrómetros modelo TANDEM y modelo UNIDOS.	69
Figura 4. 1. Maniquí MP3 centrado y nivelado.	73
Figura 4. 2. Diodo posicionado en el maniquí MP3 para tomar medidas de factores de salida.	75
Figura 4. 3. Ubicación de la opción “Beam Configuration” dentro del Sistema de Planificación Eclipse.	77

Figura 4. 4. Ejemplo de cómo insertar una nueva tabla de factores de salida para una energía de 9 MeV y aplicador de 6x6 cm ²	77
Figura 4. 5. Referencia de cómo importar las curvas de dosis en profundidad en el sistema de planificación Eclipse en la interfaz de configuración del haz.	78
Figura 4. 6. Referencia de como introducir los parámetros de SSD efectiva dentro del sistema de planificación Eclipse.	80
Figura 4. 7. Insertos de diferentes tamaños rectangulares para simular casos clínicos.	81

Figura 5. 1. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (Ig) de la SSD estándar (Io) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 9 MeV y un aplicador de 6x6 cm ²	95
Figura 5. 2. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (Ig) de la SSD estándar (Io) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 9 MeV y un aplicador de 10x10 cm ²	96
Figura 5. 3. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (Ig) de la SSD estándar (Io) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 9 MeV y un aplicador de 15x15 cm ²	97
Figura 5. 4. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (Ig) de la SSD estándar (Io) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 9 MeV y un aplicador de 20x20 cm ²	97
Figura 5. 5. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (Ig) de la SSD estándar (Io) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 9 MeV y un aplicador de 25x25 cm ²	98

Figura 6. 1. Factores de salida en función del tamaño de campo.....	105
Figura 6. 2. Variación de distribución de dosis en profundidad con el tamaño de campo. ...	108

Figura B. 1. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (Ig) de la SSD estándar (Io) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 4MeV y un aplicador de 6x6 cm ²	133
Figura B. 2. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (Ig) de la SSD estándar (Io) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 4MeV y un aplicador de 10x10 cm ²	134
Figura B. 3. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (Ig) de la SSD estándar (Io) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 4 MeV y un aplicador de 15x15 cm ²	134
Figura B. 4. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (Ig) de la SSD estándar (Io) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 4 MeV y un aplicador de 20x20 cm ²	135

Figura B. 5. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 4 MeV y un aplicador de 25x25 cm ²	135
Figura B. 6. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 6MeV y un aplicador de 6x6 cm ²	136
Figura B. 7. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 6 MeV y un aplicador de 10x10 cm ²	137
Figura B. 8. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 6 MeV y un aplicador de 15x15 cm ²	137
Figura B. 9. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 6 MeV y un aplicador de 20x20 cm ²	138
Figura B. 10. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 6 MeV y un aplicador de 25x25 cm ²	138
Figura B. 11. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 12MeV y un aplicador de 6x6 cm ²	139
Figura B. 12. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 12 MeV y un aplicador de 10x10 cm ²	139
Figura B. 13. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 12 MeV y un aplicador de 15x15 cm ²	140
Figura B. 14. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 12 MeV y un aplicador de 20x20 cm ²	140
Figura B. 15. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 12 MeV y un aplicador de 25x25 cm ²	141
Figura B. 16. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 15MeV y un aplicador de 6x6 cm ²	142
Figura B. 17. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 15 MeV y un aplicador de 10x10 cm ²	142

Figura B. 18. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (Ig) de la SSD estándar (Io) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 15 MeV y un aplicador de 15x15 cm ²	143
Figura B. 19. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (Ig) de la SSD estándar (Io) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 15 MeV y un aplicador de 20x20 cm ²	143
Figura B. 20. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (Ig) de la SSD estándar (Io) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 15 MeV y un aplicador de 25x25 cm ²	144
Figura B. 21. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (Ig) de la SSD estándar (Io) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 18MeV y un aplicador de 6x6 cm ²	145
Figura B. 22. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (Ig) de la SSD estándar (Io) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 18MeV y un aplicador de 10x10 cm ²	145
Figura B. 23. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (Ig) de la SSD estándar (Io) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 18 MeV y un aplicador de 15x15 cm ²	146
Figura B. 24. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (Ig) de la SSD estándar (Io) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 18 MeV y un aplicador de 20x20 cm ²	146
Figura B. 25. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (Ig) de la SSD estándar (Io) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 18MeV y un aplicador de 25x25 cm ²	147

LISTA DE TABLAS

Tabla 2. 1. Factores de Salida de electrones en función del tamaño de campo para diferentes aplicadores para un haz de 9 MeV (utilizando una SSD=100cm).....	60
Tabla 2. 2. SSDeff promediada para cada aplicador para un acelerador Varian 2100.	62
Tabla 2. 3. Factores de air-gap en función del tamaño de campo definido a una SSD=100 cm y SSD para un haz de electrones de 9 MeV.	63
Tabla 5. 1. Valores de R_{50} determinados usando el software MEPHYSTO y valores de Z_{ref} calculados.	83
Tabla 5. 2. Valores de R_{50} obtenidos en las calibraciones del acelerador lineal en los años 2012 y 2014.	83
Tabla 5. 3. Comparación de resultados del factor de salida para un campo $2 \times 2 \text{ cm}^2$ usando una energía de electrones de 9 MeV medidos con una cámara plano paralela y un diodo semiconductor.....	84
Tabla 5. 4. Valores de factores de salida medidos (sin normalizar) para un haz de electrones de 9 MeV.....	84
Tabla 5. 5. Valores de salida medidos para un haz de electrones de 9 MeV normalizados respecto al campo de $10 \times 10 \text{ cm}^2$ y el aplicador de $10 \times 10 \text{ cm}^2$	85
Tabla 5. 6. Diferencia porcentual luego de comparar los factores de salida medidos para un haz de electrones de 9 MeV y los valores publicados por el grupo de trabajo número 71 de la AAPM para la misma energía.	85
Tabla 5. 7. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 9 MeV usando un aplicador de $6 \times 6 \text{ cm}^2$ y normalizados respecto al campo de $15 \times 15 \text{ cm}^2$ y el aplicador de $15 \times 15 \text{ cm}^2$	86
Tabla 5. 8. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 9 MeV usando un aplicador de $10 \times 10 \text{ cm}^2$ y normalizados respecto al campo de $15 \times 15 \text{ cm}^2$ y el aplicador de $15 \times 15 \text{ cm}^2$	86
Tabla 5. 9. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 9 MeV usando un aplicador de $15 \times 15 \text{ cm}^2$ y normalizados respecto al campo de $15 \times 15 \text{ cm}^2$ y el aplicador de $15 \times 15 \text{ cm}^2$	87
Tabla 5. 10. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 9 MeV usando un aplicador de $20 \times 20 \text{ cm}^2$ y normalizados respecto al campo de $15 \times 15 \text{ cm}^2$ y el aplicador de $15 \times 15 \text{ cm}^2$	88

Tabla 5. 11. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 9 MeV usando un aplicador de 25x25 cm ² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm ² y el aplicador de 15x15 cm ²	89
Tabla 5. 12. Factores de salida medidos para un haz de electrones de 4 MeV y normalizados respecto al valor obtenido usando el aplicador de 15x15 cm ² abierto.	91
Tabla 5. 13. Factores de salida medidos para un haz de electrones de 6 MeV y normalizados respecto al valor obtenido usando el aplicador de 15x15 cm ² abierto.	91
Tabla 5. 14. Factores de salida medidos para un haz de electrones de 12 MeV y normalizados respecto al valor obtenido usando el aplicador de 15x15 cm ² abierto.	91
Tabla 5. 15. Factores de salida medidos para un haz de electrones de 15 MeV y normalizados respecto al valor obtenido usando el aplicador de 15x15 cm ² abierto.	93
Tabla 5. 16. Factores de salida medidos para un haz de electrones de 18 MeV y normalizados respecto al valor obtenido usando el aplicador de 15x15 cm ² abierto.	94
Tabla 5. 17. Valores de carga medidos para todos los tamaños de cono y a diferentes SSD (100, 110 y 120 cm mas dmax) utilizando un haz de electrones de 9 MeV	95
Tabla 5. 18. Valores de distancia fuente superficie efectiva (SSDeff) calculados para todas las energías disponibles del acelerador lineal y para todos los conos	99
Tabla 5. 19. Diferencia porcentual entre los valores de SSDeff calculados y los valores reportados por el grupo de trabajo 71 de la AAPM en su reporte número 258.	99
Tabla 5. 20. Resultados de dosis medida usando el diodo semiconductor, dosis calculada por el sistema de planificación de tratamiento y dosis calculada puntualmente para planes usando diferentes aplicadores, diferentes insertos y un haz de electrones de 9 MeV.	100
Tabla 5. 21. Resultados de dosis medida usando el diodo semiconductor, dosis calculada por el sistema de planificación de tratamiento y dosis calculada puntualmente para planes usando el aplicador de 15x15 cm ² , insertos de diferente tamaño, un haz de electrones de 9 MeV y con SSD extendidas.....	100
Tabla 5. 22. Resultados de dosis medida usando el diodo semiconductor, dosis calculada por el sistema de planificación de tratamiento y dosis calculada puntualmente para planes de tratamiento usando diferentes energías, diferentes aplicadores y diferentes insertos.	101

Tabla 6. 1. Valores de Req correspondientes a cada energía disponible del acelerador lineal Trilogy.....	109
---	-----

Tabla A. 1. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 4 MeV usando un aplicador de 6x6 cm ² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm ² y el aplicador de 15x15 cm ²	117
Tabla A. 2. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 4 MeV usando un aplicador de 10x10 cm ² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm ² y el aplicador de 15x15 cm ²	117

Tabla A. 3. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 4 MeV usando un aplicador de 15x15 cm ² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm ² y el aplicador de 15x15 cm ²	117
Tabla A. 4. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 4MeV usando un aplicador de 20x20 cm ² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm ² y el aplicador de 15x15 cm ²	118
Tabla A. 5. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 4 MeV usando un aplicador de 25x25 cm ² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm ² y el aplicador de 15x15 cm ²	119
Tabla A. 6. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 6 MeV usando un aplicador de 6x6 cm ² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm ² y el aplicador de 15x15 cm ²	120
Tabla A. 7. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 6 MeV usando un aplicador de 10x10 cm ² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm ² y el aplicador de 15x15 cm ²	120
Tabla A. 8. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 6 MeV usando un aplicador de 15x15 cm ² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm ² y el aplicador de 15x15 cm ²	120
Tabla A. 9. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 6MeV usando un aplicador de 20x20 cm ² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm ² y el aplicador de 15x15 cm ²	121
Tabla A. 10. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 6 MeV usando un aplicador de 25x25 cm ² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm ² y el aplicador de 15x15 cm ²	122
Tabla A. 11. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 12 MeV usando un aplicador de 6x6 cm ² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm ² y el aplicador de 15x15 cm ²	123
Tabla A. 12. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 12 MeV usando un aplicador de 10x10 cm ² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm ² y el aplicador de 15x15 cm ²	123
Tabla A. 13. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 12 MeV usando un aplicador de 15x15 cm ² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm ² y el aplicador de 15x15 cm ²	123
Tabla A. 14. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 12MeV usando un aplicador de 20x20 cm ² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm ² y el aplicador de 15x15 cm ²	124
Tabla A. 15. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 12 MeV usando un aplicador de 25x25 cm ² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm ² y el aplicador de 15x15 cm ²	125

Tabla A. 16. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 15 MeV usando un aplicador de 6x6 cm ² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm ² y el aplicador de 15x15 cm ²	126
Tabla A. 17. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 15 MeV usando un aplicador de 10x10 cm ² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm ² y el aplicador de 15x15 cm ²	126
Tabla A. 18. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 15 MeV usando un aplicador de 15x15 cm ² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm ² y el aplicador de 15x15 cm ²	126
Tabla A. 19. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 15MeV usando un aplicador de 20x20 cm ² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm ² y el aplicador de 15x15 cm ²	127
Tabla A. 20. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 15 MeV usando un aplicador de 25x25 cm ² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm ² y el aplicador de 15x15 cm ²	128
Tabla A. 21. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 18 MeV usando un aplicador de 6x6 cm ² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm ² y el aplicador de 15x15 cm ²	129
Tabla A. 22. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 18 MeV usando un aplicador de 10x10 cm ² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm ² y el aplicador de 15x15 cm ²	129
Tabla A. 23. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 18 MeV usando un aplicador de 15x15 cm ² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm ² y el aplicador de 15x15 cm ²	129
Tabla A. 24. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 18MeV usando un aplicador de 20x20 cm ² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm ² y el aplicador de 15x15 cm ²	130
Tabla A. 25. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 18 MeV usando un aplicador de 25x25 cm ² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm ² y el aplicador de 15x15 cm ²	131

Tabla B. 1. Valores de carga medidos para todos los tamaños de cono y a diferentes SSD (100, 110 y 120 cm mas d _{max}) utilizando un haz de electrones de 4MeV	133
Tabla B. 2. Valores de carga medidos para todos los tamaños de cono y a diferentes SSD (100, 110 y 120 cm mas d _{max}) utilizando un haz de electrones de 6 MeV	136
Tabla B. 3. Valores de carga medidos para todos los tamaños de cono y a diferentes SSD (100, 110 y 120 cm mas d _{max}) utilizando un haz de electrones de 12 MeV	139
Tabla B. 4. Valores de carga medidos para todos los tamaños de cono y a diferentes SSD (100, 110 y 120 cm mas d _{max}) utilizando un haz de electrones de 15 MeV	141

Tabla B. 5. Valores de carga medidos para todos los tamaños de cono y a diferentes SSD (100, 110 y 120 cm mas d_{max}) utilizando un haz de electrones de 18 MeV	144
--	-----

INTRODUCCIÓN

La radioterapia utiliza las radiaciones ionizantes para el tratamiento de lesiones cancerosas atacando el material genético de las células malignas y afectando su proceso de crecimiento y división. También se utiliza para tratar algunas lesiones de tipo no cancerígeno como es el caso de espolones o queloides por ejemplo. La terapia con electrones ha sido una de las principales técnicas utilizadas para tratar lesiones superficiales o que requieren de una cobertura uniforme de distribución de dosis al mismo tiempo que se logra una caída de dosis aguda a mayor profundidad para proteger órganos a riesgo.

Durante un tratamiento con electrones el sistema de planificación de tratamiento (TPS por sus siglas en inglés) utiliza un algoritmo de cálculo de distribución de dosis (Haz de Lápiz Gaussiano Generalizado o GGPB por sus siglas en inglés) que requiere ser alimentado con datos específicos de factores medidos al momento de la puesta en marcha del equipo (comisionamiento), como lo son las curvas de porcentaje de dosis en profundidad (PDD) y los llamados factores de salida o “output factors” para cada una de las energías disponibles de electrones y para los diferentes tamaños de campo, de manera que el algoritmo pueda usar los datos para calcular de manera más precisa y confiable.

En el presente trabajo se llevará a cabo la medición de los factores de salida para todas las energías de electrones del acelerador lineal modelo Trilogy del Servicio de Radioterapia del Hospital de Clínicas Caracas (HCC) dado que actualmente solo se manejan los datos de los factores de salida para campos abiertos, es decir, no se toma en cuenta el efecto de colocar los insertos en el aplicador a la hora de calcular las unidades monitor (MU por sus siglas en inglés) mediante el sistema de planificación de tratamiento. Además se procederá a calcular los factores de salida para campos rectangulares. También se calcularán valores de distancia fuente superficie (SSD) efectiva para todas las energías de electrones y se introducirán al sistema de planificación para mejorar la precisión de los cálculos en tratamientos en los que se use una SSD diferente a la estándar.

El presente trabajo está estructurado en diferentes capítulos. El primer capítulo engloba la metodología de la investigación, en él se plantean la justificación del trabajo y el problema a tratar, además de desarrollar los objetivos y las limitaciones que caracterizarán la investigación.

El segundo capítulo desarrollará las bases teóricas necesarias para comprender fenómenos, métodos, materiales y técnicas utilizados o descritos en el trabajo. Este capítulo se centrará en 6 (seis) temas fundamentales que se ven entrelazados en la investigación. Los temas serán: La generación del haz de electrones, la interacción de los electrones con la materia, los detectores de radiación, el formalismo para determinar dosis absorbida en agua, el algoritmo de haz de lápiz gaussiano generalizado (GGPB) y el cálculo manual de unidades monitor.

En el tercer capítulo se describirán los materiales y equipos utilizados mientras en el cuarto capítulo se describirá la metodología experimental de la investigación. En el quinto capítulo se presentarán los resultados obtenidos y en el sexto capítulo se realizará la discusión de dichos resultados.

CAPÍTULO 1

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 PROBLEMA

No se dispone de todos los datos referentes a los factores de salida para todas las energías y aplicadores disponibles del acelerador lineal para tratamientos con electrones, por lo que en algunos casos los cálculos no se ajustan adecuadamente a los valores dosimétricos obtenidos experimentalmente.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Las radiaciones ionizantes son utilizadas para tratar ciertas lesiones pero también van en detrimento de la salud humana por lo que es importante poder realizar un cálculo que se adapte a la prescripción médica.

1.3 LIMITACIONES

No se medirán los factores de salida para campos circulares ni tampoco para campos irregulares.

1.4 OBJETIVOS.

1.4.1 General

Poner en marcha el algoritmo de Haz de Lápiz Gaussiano Generalizado para tratamientos con haces de electrones usando campos cuadrados y rectangulares.

1.4.2 Específicos

- Medir los factores de salida de un haz de electrones de 9 MeV para diferentes tamaños de campo cuadrados y compararlos con los valores proporcionados en la bibliografía de referencia.
- Medir los factores de salida de los haces de electrones de distintas energías para diferentes tamaños de campo cuadrados e introducir los datos al sistema de planificación de tratamiento.
- Comparar la dosis planificada, la dosis medida y la dosis calculada manualmente en un tratamiento con electrones utilizando campos cuadrados y rectangulares.
- Medir la carga colectada para todas las energías disponibles del acelerador utilizando todos los aplicadores disponibles (campos abiertos) a distancias fuente superficie estándar y extendidas para calcular los valores de distancia fuente superficie efectiva (SSD_{eff}) e introducirlos al sistema de planificación de tratamiento.
- Comparar dosimétricamente la dosis planificada, la dosis medida y la dosis calculada manualmente en un tratamiento con electrones utilizando una distancia fuente superficie (SDD) extendida mediante la técnica que toma en consideración la SSD_{eff} calculada.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES

Los electrones de alta energía han sido usados en radioterapia desde principios de la década de los 50. Originalmente los haces utilizados provenían de equipos llamados betatrón aunque también habían disponibles pocos aceleradores lineales con energías de electrones relativamente bajas. A partir de 1970 los aceleradores lineales de alta energía que ofrecían tratamiento con fotones y un rango de energías para tratamiento con electrones comenzaron a incrementar su disponibilidad para uso clínico. El auge en el desarrollo comercial de los aceleradores se incrementó por la experiencia clínica obtenida en centros importantes, en los cuales se dejó constancia de que en algunas situaciones “no hay alternativa más que la terapia con electrones”. [1]



Figura 2. 1. Sesión de radioterapia en paciente femenino.

El rango energético de electrones que tiene mayor utilidad en la práctica clínica va de 6 a 20 MeV. A estas energías, los haces de electrones pueden utilizarse para tratar lesiones

superficiales (<5 cm) con una caída de dosis aguda después de la lesión. Las principales aplicaciones del tratamiento con electrones son tratamientos dirigidos a la piel o labios, irradiaciones a la pared costal, administraciones de dosis de refuerzo a lesiones que fueron tratadas anteriormente con fotones, tratamientos a lesiones en cabeza y cuello. A pesar de que muchas de las zonas mencionadas anteriormente podrían tratarse con otras técnicas como rayos X superficiales, Braquiterapia o haces tangenciales de fotones, la irradiación con electrones ofrece ventajas en términos de uniformidad de dosis en el volumen blanco a la vez que se minimiza la dosis a tejidos más profundos.

2.2 GENERACIÓN DEL HAZ DE ELECTRONES

Los aceleradores lineales son equipos que aceleran electrones a energías cinéticas desde 4 a 25 MeV mediante el uso de campos de radiofrecuencia con rango entre 103 MHz hasta 104 MHz. En los aceleradores lineales los electrones son acelerados siguiendo una trayectoria recta en estructuras especiales llamadas guías de onda aceleradoras. Los electrones siguen la trayectoria lineal a través de la misma diferencia de potencial (baja) varias veces. [2]



Figura 2. 2. *Acelerador lineal Varian modelo Trilogy.*

Estas unidades son capaces de emitir múltiples energías de electrones y de Rayos X para seleccionar la más adecuada a cada tratamiento.

Las partes que intervienen en la creación del haz son:

- Sistema generador de radiofrecuencias.
- Sistema de inyección.
- Guía aceleradora.
- Sistema de desviación del haz.
- Sistema de colimación y control del haz.
- Sistemas auxiliares (vacío, refrigeración, etc.)

2.2.1 Sistema de Generación de Radiofrecuencias

En un acelerador las fuentes de energía de radiofrecuencia pueden provenir de un magnetrón, que origina energía de microondas de alta potencia o un klystron que es un amplificador de potencia de las radiofrecuencias que se generan por un oscilador de baja potencia y que se hacen incidir en una de las cavidades del klystron. En ambos casos se logran establecer campos electromagnéticos intensos en cavidades de microondas

Ambos dispositivos basan su principio de funcionamiento en la aceleración y desaceleración de electrones en el vacío para producir radiofrecuencias de alta potencia. Cuando un electrón se mueve a una velocidad significativa y es frenado por acción de un campo electromagnético, este transmite energía al campo. Tanto en el magnetrón como en el klystron los electrones son producidos por emisión termoiónica en un cátodo, para luego acelerarse hacia el ánodo en un campo pulsado a través de cavidades que tienen gran eficacia para producir campos eléctricos de mucha intensidad por acumulación de carga en sus paredes. [3]

2.2.2 Klystron

El Klystron es un dispositivo formado por cavidades resonantes. Para aceleradores de energías a partir de 15 MeV se utiliza un klystron para producir microondas, con un número de cavidades de 3 a 5. Con la finalidad de simplificar la explicación se tomará como ejemplo un klystron con solo dos cavidades. (Véase Figura. 2.3)

A la primera cavidad se hacen llegar las microondas de baja potencia que van a ser amplificadas; estas microondas establecen un campo eléctrico alterno a través de las paredes de la cavidad el cual funcionará como un agrupador de electrones, es decir los electrones que entren en la primera cavidad cuando el campo eléctrico tenga un valor negativo serán acelerados mientras que los que entren cuando el campo tenga valor positivo serán retardados y los que entren cuando el valor del campo sea cero no sufrirán ningún efecto. Esto terminará agrupando los electrones en "paquetes" y por esto la primera cavidad recibe el nombre de cavidad agrupadora.

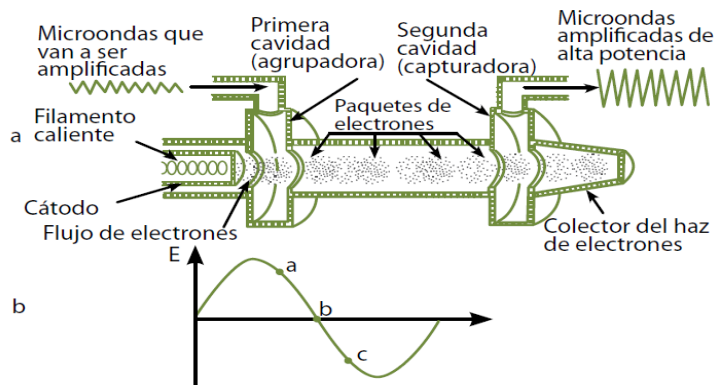


Figura 2. 3. (a) Esquema de un klystron de dos cavidades resonantes. (b) Campo eléctrico alterno.

La segunda cavidad resuena a la frecuencia de llegada de los paquetes y cuando estos llegan, generan un campo eléctrico retardador que induce cargas en las terminaciones de la cavidad e iniciando un proceso de conversión de energía, de esta forma, gran parte de la energía cinética de los electrones es transformada en un campo eléctrico bastante intenso generando así microondas. El resto de la energía que no se convierte en microondas es disipada en forma de

calor en una zona del klystron llamada "Colector" donde el calor se elimina por medio de un circuito de agua refrigerada. [3][4]

El proceso de conducir las microondas desde el magnetrón o klystron hasta la estructura aceleradora se lleva a cabo mediante el uso de guías de onda rectangulares por medio de la reflexión de las paredes de la misma. Las guías son llenadas de hexafluoruro de azufre (SF₆) a la presión adecuada para aumentar la capacidad de conducción.

2.2.3 Sistema de inyección y sistema de aceleración de los electrones

El sistema de inyección del acelerador consta básicamente de un filamento que emite electrones por efecto termoiónico (cátodo) llamado cañón de electrones y un ánodo perforado para dejar pasar los electrones. El cañón de electrones puede ser de tipo diodo o tipo tríodo, la diferencia básica en el tríodo es la presencia de una rejilla que otorga la ventaja adicional de poder variar la corriente en un amplio rango de valores sin variar el voltaje entre el ánodo y el cátodo. [2]

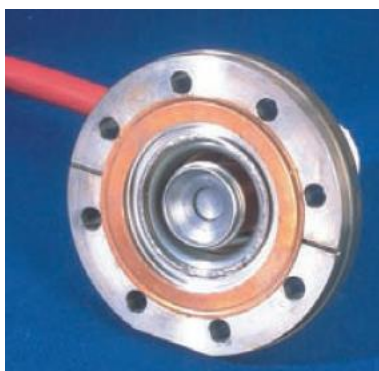


Figura 2. 4. Cañón de electrones tipo tríodo de un Varian Clinac-18.

Una vez que los electrones son emitidos por el cátodo, son acelerados debido al campo eléctrico originado por los pulsos de tensión que envía el modulador al cátodo o la rejilla, ya sea que se use un diodo o tríodo respectivamente.

Las guías de onda son estructuras metálicas rectangulares o circulares al vacío que se utilizan en la transmisión de microondas. Los electrones son acelerados en la guía de onda aceleradora utilizando transferencia de energía desde los campos de radiofrecuencia de alta energía los cuales se hacen incidir en la guía de onda aceleradora y se producen por los generadores de radiofrecuencia. [3]

El tipo de guía de onda aceleradora más simple se obtiene de una estructura cilíndrica a la que se le añaden agujeros en forma de discos circulares en el centro y colocados a una misma distancia uno de otro dentro de la guía. Los discos dividen la guía de onda en cavidades cilíndricas que forman la estructura básica de la guía de onda aceleradora.

La guía de onda aceleradora se encuentra al vacío para permitir la propagación libre de electrones, mientras que las cavidades de la guía cumplen dos propósitos:

- Acoplar y distribuir la energía de microondas entre cavidades adyacentes
- Suministrar un campo eléctrico adecuado para acelerar los electrones

2.2.4 Estructura aceleradora de onda progresiva

En la estructura de onda viajera las microondas entran a la guía de onda aceleradora en una zona próxima al cañón de electrones y se propaga hasta el final de la guía donde es absorbida para no provocar ninguna reflexión o para ser redirigida a la entrada de la guía. En este tipo de configuración solo una de cuatro cavidades es apta para acelerar electrones en algún momento dado, aportando un campo eléctrico en la dirección de propagación. [2][3]



Figura 2. 5. Estructura aceleradora de onda progresiva.

2.2.5 Estructura aceleradora de onda estacionaria

En este tipo de estructuras, cada extremo de la guía de onda termina en un disco conductor que refleja el poder de microondas (Véase Figura 2.6), como resultado se obtienen una acumulación de ondas estacionarias en la guía. Bajo esta configuración, en todo momento y en cada dos cavidades no se genera campo eléctrico, por ende no hay ganancia de energía para los electrones. Estas cavidades solo sirven para acoplamiento por lo que podrían retirarse de la guía y disminuir en un 50% su longitud. [2][3]

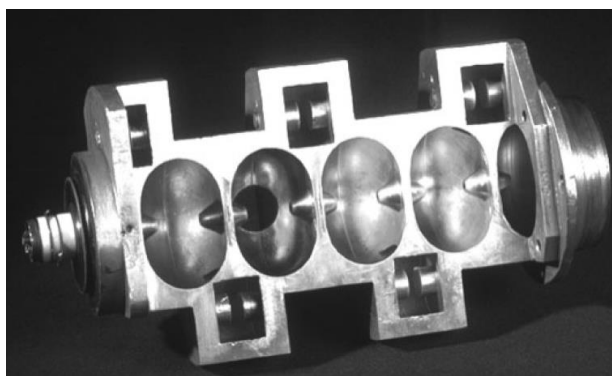


Figura 2. 6. Vista transversal de una estructura aceleradora de onda estacionaria de un acelerador lineal de 6 MV.

2.2.6 Sistema de desviación del haz de electrones

En los aceleradores de baja energía (<6 MV) el blanco es empotrado al final de la guía de onda aceleradora y no se necesita un sistema de desviación del haz, sin embargo para energías mayores la longitud de la guía de onda aceleradora no permite que esta se monte en el brazo del acelerador (Véase Figura 2.7). En estos casos se monta de forma paralela al eje de rotación del brazo por lo que se hace necesario un sistema de desviación del haz conformado por un conjunto de bobinas encargadas de generar campos magnéticos que transporten el haz desde el final de la guía de onda aceleradora hasta la posición en la ventana de electrones o en el blanco de rayos x, dependiendo del modo de tratamiento que se seleccione. [2][3]

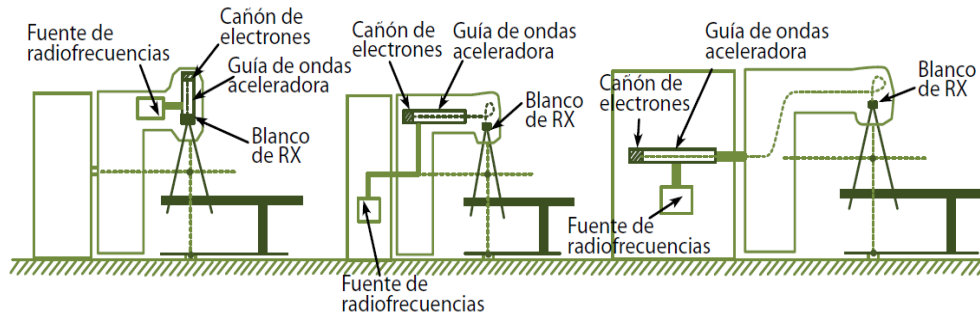


Figura 2. 7. *Sistemas de desviación para diferentes modelos de acelerador lineal.*

El sistema de desviación también incluye bobinas encargadas de generar campos magnéticos lo suficientemente intensos como para mantener el haz de electrones en el mismo eje de la guía de onda aceleradora con la menor divergencia posible. Además los sistemas de desviación cuentan con un filtro o ventana de energía que elimina electrones que difieran en más de 5% de la prevista, ya que el radio de curvatura de estos electrones es diferente por lo que la ventana en si se vuelve un filtro adicional para garantizar la calidad del haz de salida.

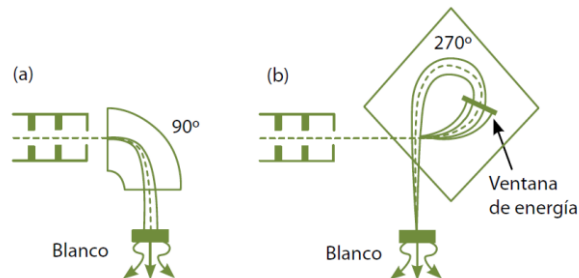


Figura 2. 8. *Desviaciones de 90° y 270°.*

Entre los diseños comerciales, varían los ángulos utilizados en el sistema de desviación del haz (Véase Figura 2.8), esto se debe a derechos de patente entre los diseños fabricados, pero básicamente el mecanismo utilizado y su función sigue siendo el mismo. [5]

2.2.7 Producción de un haz extenso de electrones

Para la producción de un haz de electrones para uso clínico, se aparta el blanco de rayos X y el filtro aplanador bajo control de seguridad. El haz de electrones emerge del sistema de

vacío a través de una ventana de metal delgado, cuyo material se elige típicamente con un número atómico bajo y se diseña para producir mínima dispersión y bremsstrahlung. El haz resultante es un haz angosto de pocos milímetros de diámetro y con un perfil esencialmente gaussiano. [5]

El haz de electrones angosto no es adecuado para el uso clínico dado que se requieren distribuciones de dosis que sean razonablemente uniformes en tamaños de campo que podrían ir hasta $25 \times 25 \text{ cm}^2$ por lo que resulta necesario un ensanchamiento del haz. [9]

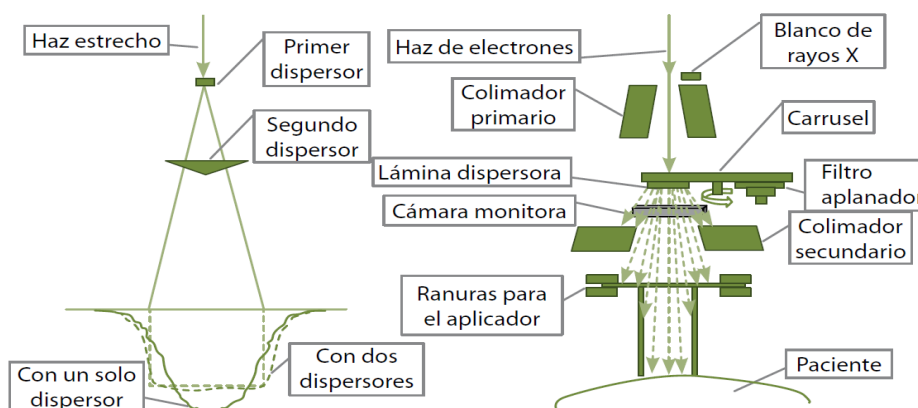


Figura 2. 9. La parte izquierda muestra el efecto del uso de dos láminas dispersoras para ensanchar el haz de electrones. La parte derecha muestra el cabezal de un acelerador cuando se selecciona el modo de tratamiento con electrones.

La mayoría de los aceleradores utiliza una bandeja dispersora para ensanchar el haz, en este caso se atraviesan en el haz bandejas delgadas de materiales de número atómico alto y se posicionan en el mismo carrusel que carga el filtro aplanador de rayos X (Véase Figura 2.9). El espesor de la bandeja se elige cuidadosamente tomando en cuenta que sea lo suficientemente gruesa para permitir niveles de dispersión electrónica aceptable pero que a la vez sea lo suficientemente delgada para prevenir que las pérdidas de energía y la contaminación por bremsstrahlung sean muy altas. Como este balance de interacción electrónica es dependiente de la energía cada una de las energías disponibles de electrones requiere su propia lámina aunque en la práctica no siempre es lo que se realiza.

2.2.8 Sistema de Control de la Dosis Absorbida (Cámaras Monitoras)

Los monitores de dosis absorbida usados comúnmente en los aceleradores son cámaras de ionización de transmisión que controlan la salida del haz continuamente. La mayoría son cámaras selladas, con su respuesta independiente de la presión y de la temperatura. Suelen estar situadas entre el filtro aplanador (o lámina dispersora en el caso de electrones) y el colimador secundario de fotones. Para evitar la posible curvatura de la ventana de las cámaras con los cambios de presión, se rellenan de gas de modo que su presión es mayor que la atmosférica y para evitar la recombinación de iones, se les aplica altos voltajes colectores. En los aceleradores también puede haber dos cámaras diferentes, una para los haces de fotones y otra para los de electrones, una cerrada y la otra abierta y fabricadas con diferentes materiales, las primeras de un material cerámico y las segundas con un material adecuado para los electrones como es el Kapton.

El sistema de control de la dosis absorbida consta de dos cámaras de ionización completamente independientes, de modo que si la primera falla la segunda termina la irradiación tras una pequeñísima dosis absorbida adicional a la prescrita. Si fallaran las dos cámaras, un reloj adicional cortaría la irradiación. Los electrodos de las cámaras están divididos en sectores de modo que sirven como sistemas monitores separados para controlar la dosis absorbida integral, la tasa de dosis absorbida y la distribución del haz de radiación con el fin de asegurar su homogeneidad y su simetría. (Véase Figura 2.10)

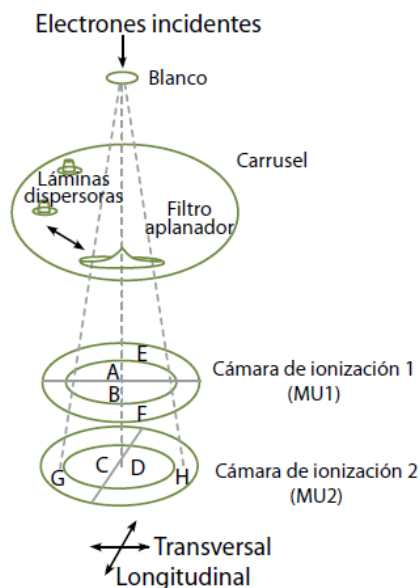


Figura 2. 10. Esquema de la división en los distintos sectores de las cámaras de ionización en un acelerador.

Las cámaras también controlan otros aspectos de seguridad. Por ejemplo, en las unidades de tratamiento multimodalidad los sistemas de monitoreo del haz son complejos. La intensidad de la corriente de un haz clínico de electrones es del orden de dos o tres órdenes de magnitud inferior que la que produce un haz de fotones. Así, la intensidad media en la ventana de electrones de un haz de rayos X de 6 MV es de unos 100 mA y la de un haz de electrones de 6 MeV es de 0,1 mA aproximadamente. Podría ocurrir en caso de mal funcionamiento que la intensidad de electrones prevista para producir rayos X no atravesase el blanco/ filtro aplanador y, con motivo de seguridad, son necesarios sistemas redundantes de monitoreo que lo detecten.

2.2.9 Aplicadores

Cuando atraviesan las láminas dispersoras, los electrones interaccionan con materiales de alto número atómico del cabezal. Las dispersiones producen rayos X que contaminan el haz de electrones y provocan pérdida de nitidez en el borde del haz. Para evitar el efecto anterior se debe colimar el haz utilizando aplicadores colocados cerca de la superficie del paciente y

fabricados con material de número atómico bajo y con un espesor que sea inferior al alcance de los electrones en ese material. El espesor que se requiere es la tercera parte del alcance de los electrones aproximadamente.

Cuando se inserta un aplicador de electrones, las mandíbulas de los colimadores secundarios establecen un tamaño de campo en el isocentro. La apertura de los colimadores tiene influencia directa en la cantidad de radiación que llega a los diafragmas, por ende, en la radiación dispersa que se genera en los aplicadores. [3][5]

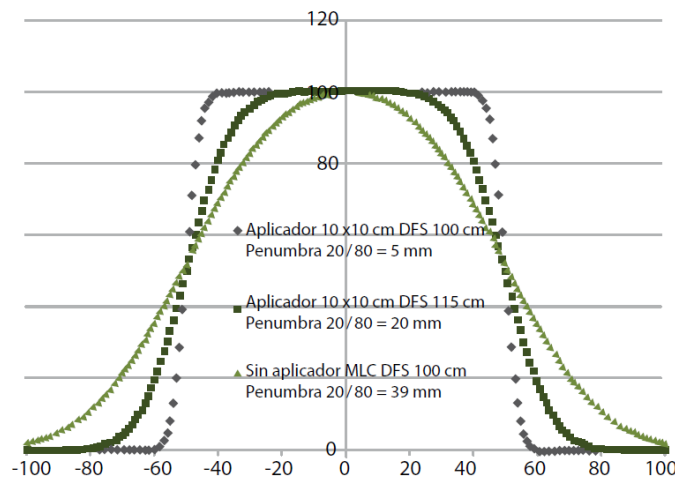


Figura 2. 11. Efecto de la distancia del aplicador sobre la distribución de dosis absorbida.

Para conseguir una uniformidad aceptable, los aplicadores se deben colocar directamente sobre la superficie del paciente o muy cercanos a ella. Si no se utiliza el aplicador, se obtiene una penumbra resultante muy grande. Cuanto más cerca esté el aplicador de la superficie de entrada del haz la penumbra se hace más estrecha. (Véase Figura 2.11)

2.3 INTERACCIÓN DE LOS ELECTRONES CON LA MATERIA

El presente trabajo evaluará parámetros relacionados a tratamientos con haces de electrones, por lo cual resulta de suma importancia conocer la manera de interaccionar de dichas partículas cargadas con la materia para poder comprender características definidas del haz de

electrones como lo es la distribución de dosis en profundidad o fenómenos que afectan las mediciones en factores de campo, por ejemplo.

A medida que los electrones viajan a través de un medio, interactúan con átomos mediante una variedad de procesos debido a la interacción entre fuerzas coulombianas. Los procesos son colisiones inelásticas con electrones atómicos (ionización y excitación), colisiones inelásticas con el núcleo (bremsstrahlung), colisiones elásticas con electrones atómicos y colisiones elásticas con el núcleo.

En las colisiones inelásticas, parte de la energía cinética se pierde para producir ionizaciones o convertirla en otra forma de energía como energía fotónica o energía en forma de excitación. En las colisiones elásticas la energía cinética no se pierde, aunque se redistribuye entre las partículas que emergen de la colisión. En medios de número atómico bajo como agua o tejidos, los electrones pierden energía de manera predominante a través de eventos de ionización con electrones atómicos. En materiales de número atómico alto como el plomo, la producción de bremsstrahlung es más importante. En el proceso de colisión con los electrones atómicos, si la energía cinética adquirida por el electrón es suficientemente elevada como para causar una futura ionización, el electrón se conoce como electrón secundario. A medida que el haz de electrones viaja a través del medio la energía se va degradando hasta que los electrones alcanzan energías térmicas y son capturados por átomos adyacentes. [4]

2.3.1 Pérdidas por Colisión (Ionización y Excitación)

La tasa de pérdida de energía depende de la densidad electrónica del medio. La tasa de pérdida de energía por gramo por centímetro cuadrado que es llamado, poder de frenado másico, es mayor para materiales de número atómico bajo (Véase Figura 2.12). Hay dos razones que explican lo anterior, primero, los materiales de número atómico (Z) alto tienen menos electrones por gramos que los materiales de Z bajo, además los materiales de número atómico alto tienen electrones con mayor poder de ligadura que no están tan disponibles para ese tipo de interacción.

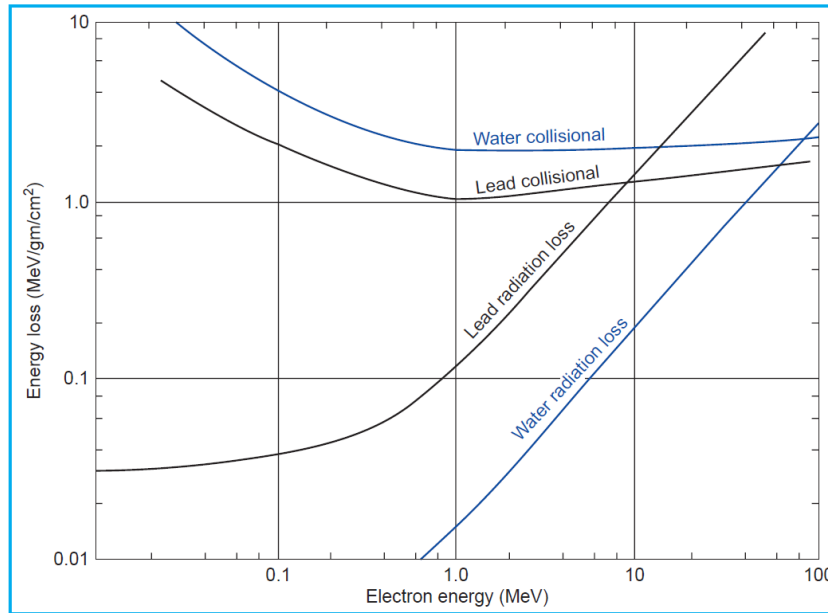


Figura 2. 12. Tasa de pérdida de energía en MeV por g/cm² como función de la energía de los electrones para agua y plomo.

2.3.2 Pérdidas Radiativas (Bremsstrahlung)

La pérdida de energía por centímetro en un medio debido a bremsstrahlung es aproximadamente proporcional a la energía del electrón y al cuadrado del número atómico (Z^2). Además, la probabilidad de pérdida radiativa relativa a la pérdida por colisión incrementa con la energía cinética del electrón y con Z . Eso significa que la producción de rayos X es más eficiente para electrones de mayor energía y blancos de número atómico alto.

2.3.3 Polarización

Un electrón de alta energía pierde más energía por gramo por centímetro cuadrado en un gas que un medio más denso, esto debido a la polarización apreciable del medio condensado [6]. Este fenómeno es de particular importancia en la dosimetría con cámaras de ionización cuando se compara la energía depositada en un medio y en una cavidad de gas. La tasa de poder de frenado másico de agua a aire varía con la energía del electrón, y por consecuencia, el factor

de conversión de dosis para una cámara de ionización de aire que está midiendo en agua varía con la profundidad.

2.3.4 Poder de Frenado

El poder de frenado másico total de un material para partículas cargadas está definido como el cociente de dE por ρdl , donde dE es la pérdida de energía total de la partícula que viaja una longitud dl a través de un material de densidad ρ . [7]

2.3.5 Dispersión electrónica

Cuando el haz de electrones pasa a través de un medio, los electrones sufren múltiples dispersiones debido a las interacciones coulombianas entre los electrones incidentes y el núcleo del medio (predominantemente). Como resultado, los electrones adquieren componentes de velocidad y desplazamientos transversos a la dirección original de movimiento. Para aplicaciones prácticas, la propagación espacial y angular de un haz de electrones angosto y colimado puede aproximarse a una distribución gaussiana. [8]

El poder de dispersión varía aproximadamente como el cuadrado del número atómico e inversamente al cuadrado de la energía cinética. Por esta razón, los materiales de número atómico alto son empleados en la construcción de bandejas de dispersión.

2.4 DETECTORES

La radiación ionizante en general no es perceptible por los sentidos, por lo que es necesario valerse de instrumentos apropiados para detectar su presencia. Se han desarrollado muchos tipos de detectores de radiación. Cada clase de detector es sensible a cierto tipo de radiación y a cierto intervalo de energía.

El diseño de los detectores está basado en el conocimiento de la interacción de las radiaciones con la materia. Como ya sabemos, las radiaciones depositan energía en los materiales, principalmente a través de la ionización y excitación de sus átomos. Además, puede haber emisión de luz, cambio de temperatura, o efectos químicos, todo lo cual puede ser un indicador de la presencia de radiación.

En este trabajo se utilizarán detectores de radiación como lo son las cámaras de ionización para la dosimetría relativa mientras que para medidas de dosis absoluta se utilizará el diodo semiconductor por presentar ventajas respecto a mediciones dosimétricas para campos pequeños en comparación con la cámara de ionización. A continuación se describen los detectores utilizados en el presente trabajo así como los principios físicos fundamentales que explican su funcionamiento.

2.4.1 Cámaras de Ionización

Una cámara de ionización consiste básicamente en una cavidad llena de gas, que posee una pared conductora externa y un electrodo colector que se conectan a una diferencia de potencial específica.

Cuando la radiación ionizante entra en contacto con el gas, crea pares iónicos, es decir, portadores de carga positivos y negativos que se ven atraídos a los electrodos creando una señal de corriente que puede ser medida. La pared y el colector se separan por un aislante para reducir la corriente de fuga.

En algunos casos también se les suele colocar un electrodo de guarda con la finalidad de interceptar corrientes de fuga y hacerla fluir directamente a tierra sin afectar el electrodo de colección y también para evitar que el campo eléctrico se deforme en la periferia. Las cámaras de ionización se construyen con diferentes geometrías según su aplicación. Entre las más habituales se encuentran la geometría cilíndrica y la geometría plano- paralela. [9]

2.4.1.1 Cilíndricas

Se utilizan para calibración de haces en radioterapia externa. El tipo de cámara cilíndrica más extendido es el diseñado por Farmer, la forma del volumen activo de la cámara se asemeja a un dedal dado que la forma de la punta es de cúpula cónica. (Véase Figura 2.13)

El volumen de detección de las cámaras recomendadas para dosimetría debe estar comprendido entre 0,1 y 1 cm³ para aproximarse a la realización física de una cavidad ideal de Bragg-Gray. Dicho rango de volúmenes cumple el compromiso entre la necesidad de obtener un volumen sensible a la medida y la capacidad de realizar la medida puntual.

Mediante el campo eléctrico establecido por la alta tensión aplicada entre los electrodos (entre 200 y 400 V) se recoge la carga eléctrica que es proporcional a la dosis absorbida en un punto bien determinado de su interior.

La geometría cilíndrica posee la propiedad de tener un campo eléctrico de intensidad variable, con una intensidad alta en las proximidades del electrodo central.

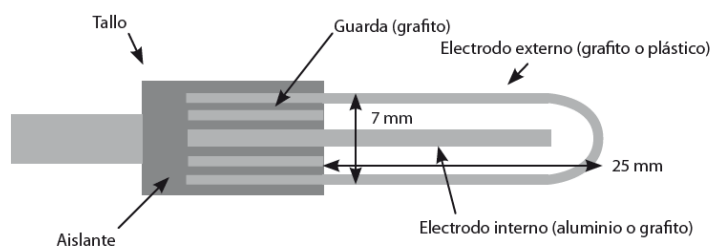


Figura 2. 13. Esquema de una cámara tipo Farmer.

2.4.1.2 Plano-Paralelas

Las cámaras plano paralelas tienen forma de disco con una ventana circular de 1 mm de espesor que constituye la ventana de entrada. La parte interna de la ventana es uno de los electrodos. El otro electrodo es un disco conductor situado en paralelo a una distancia menor o igual a 2 mm. Estos electrodos están situados sobre el material que constituye la cámara, al cual está conectado el cable, que está colocado en una dirección paralela a la ventana de entrada de

la cámara. Existe un tercer electrodo, el de guarda, en forma de anillo, que tiene como misión evitar que el campo eléctrico se deforme en la periferia, delimitando perfectamente el volumen activo y de forma que la contribución de electrones proveniente de la pared lateral sea despreciable. La anchura de este anillo debe ser igual o superior a 1,5 veces la separación entre los electrodos. (Véase Figura. 2.14).

El volumen sensible de estas cámaras, entre 0,05 y 0,5 cm³, es una fracción del volumen total de la cavidad de aire, a través del cual pasan las líneas de campo eléctrico existente entre los electrodos.

La tensión de colección se aplica sobre el electrodo externo y la carga se colecta en el electrodo interno. En algunos modelos no es conveniente incrementar la tensión de colección por encima de los 100 V a fin de evitar deformaciones, ya que hay que recordar que el espesor del electrodo que hace de ventana es del orden de 1 mm.

A causa de su forma geométrica, de la buena definición del volumen efectivo de colección, permitido por su anillo de guarda si está bien diseñado, y del pequeño espacio que existe entre sus electrodos, la perturbación que introduce en la fluencia que mide es mínima, por lo que además de funcionar como una buena cavidad Bragg–Gray, el factor de perturbación por electrodo es muy próximo a la unidad y puede considerarse constante para cualquier energía del haz incidente de electrones. Hay que tener en cuenta que la perturbación producida por el detector, depende de su volumen y de la energía del haz. La perturbación es tanto más grande cuanto más baja es la energía del haz, lo que adquiere especial importancia en el caso de haces de electrones de baja energía. De aquí la recomendación de utilizar cámaras de ionización plano–paralelas en la dosimetría de electrones de $E_0 < 10$ MeV. [9]

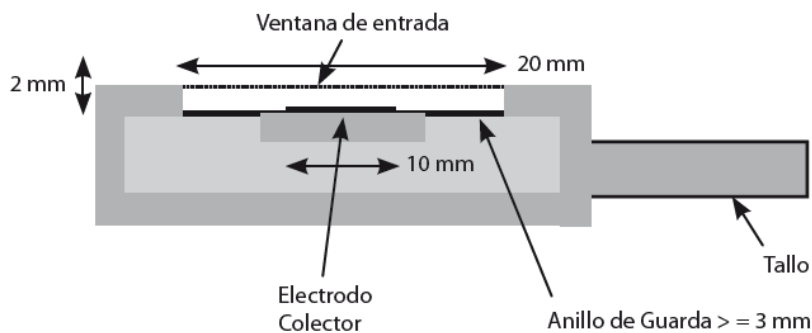


Figura 2. 14. Esquema de una cámara plano – paralela.

Las cámaras de ionización plano-paralelas, deben estar diseñadas, preferentemente, para realizar medidas en agua, y el material del que se componen, debe ser lo más homogéneo y equivalente a agua posible, o si están diseñadas para realizar medidas en un medio sólido, el material debería ser equivalente a este medio.

2.4.2 Diodos Semiconductores.

Un diodo empleado para dosimetría consiste en un cristal de silicio que se mezcla o se "dopa" con impurezas para convertirlo en silicio tipo p o tipo n.

El silicio tipo p se hace introduciendo una pequeña cantidad de algún elemento del grupo III de la tabla periódica, como por ejemplo el Boro, convirtiéndolo así en un receptor de electrones, mientras que el silicio tipo n se hace mezclando el silicio con un material del grupo V de la tabla periódica como por ejemplo el Fósforo, de esta forma se vuelve un material que recibe átomos que son portadores de carga negativa, por lo que son materiales que donan electrones.

Un diodo de unión p-n se diseña con una parte de un disco de silicio tipo p que se dopa con un material tipo n. La región tipo p del diodo es deficiente de electrones, o contiene "huecos", mientras que la región tipo n tiene exceso de electrones.

En la interface que hay entre los materiales tipo p y tipo n, se crea una pequeña región llamada región de agotamiento, debido a la difusión inicial de electrones desde la región n y huecos desde la región p a través de la unión hasta que se alcanza el equilibrio. Se genera entonces un campo eléctrico en la zona de agotamiento, el cual evita una futura difusión de portadores una vez que el equilibrio ha sido alcanzado. [9]

Cuando se irradia un diodo, se producen pares electrón- huecos (análogos al par iónico en gases) en la zona de agotamiento que inmediatamente son separados y barridos a los extremos por el campo eléctrico existente en la zona de agotamiento. Esto genera una corriente radio inducida. La corriente luego se ve aumentada por la difusión de electrones y huecos que se

producen fuera de la zona de agotamiento dentro de una longitud de difusión específica. La dirección de la corriente va de la región n a la región p (opuesta a la dirección convencional de corriente).

Los diodos son mucho más sensibles que las cámaras de ionización. Dado que la energía requerida para producir un par electrón- hueco en el Silicio es 3,5 eV comparada con los 34 eV requeridos para producir un par iónico en aire, la densidad del Silicio es 1,800 veces la del aire, la corriente producida por unidad de volumen es casi 18.000 veces mayor en un diodo que en una cámara de ionización.

Debido al número atómico del silicio ($Z=14$) comparado al del agua o aire, los diodos muestran una dependencia severa con la energía para haces de fotones de calidad no uniforme. A pesar de que algunos diodos se diseñan para proveer una compensación de energía a través de filtración, el parámetro de dependencia energía no se puede desaparecer del todo por lo que su uso en haces de rayos X se limita a dosimetría relativa en situaciones donde la calidad espectral del haz no cambia significativamente como por ejemplo medida de perfiles en campos pequeños y chequeos de constancia de dosis. Para el caso de electrones, los diodos no muestran dependencia energética ya que la tasa de poder de frenado del silicio con el agua no varía significativamente con la energía de los electrones o con la profundidad.

Los diodos muestra una dependencia angular que debe ser considerada si el ángulo de incidencia del haz cambia significativamente. Estos efectos deben determinarse realizando medidas comparativas con un detector que no muestre dependencia angular. También muestran una pequeña dependencia con la temperatura que puede ignorarse a menos que el cambio de temperatura durante la medición o desde la última calibración sea drástico. La dependencia de temperatura del diodo es más pequeña que la de la cámara de ionización. Además, su respuesta es independiente de la presión y la humedad.

Un diodo puede sufrir daño permanente cuando es irradiado por dosis muy altas de radiación ionizante. El daño es causado probablemente por el desplazamiento de los átomos del silicio de sus posiciones dentro del cristal. La extensión del daño dependerá del tipo de radiación, energía y dosis.

2.5 FORMALISMO PARA DETERMINACIÓN DE DOSIS ABSORBIDA EN AGUA

En el presente trabajo se realizarán mediciones de dosis absoluta y relativa de manera de cumplir los objetivos propuestos en la investigación. Es importante describir y desarrollar los métodos y fundamentos que se tomarán en cuenta para llevar a cabo la determinación de dicha dosis y de esta manera poder entender el motivo por el cual se está realizando el procedimiento experimental que se plantea.

El Organismo Internacional de Energía Atómica patrocina un formalismo para la determinación de la dosis absorbida en agua para el caso de electrones en su colección de informes técnicos número 398. En esta colección se presenta un Código de Práctica para dosimetría de referencia y recomendación para dosimetría relativa para haces de electrones con rango entre 3 a 50 MeV.

El formalismo está basado en un factor de calibración en términos de dosis absorbida en agua y en una calidad de haz dado. Además se introduce el uso de una nueva profundidad de referencia debido a que dicha profundidad ha demostrado reducir la influencia de diferencias espectrales entre los distintos aceleradores como de contaminación electrónica y fotónica en haces clínicos de electrones.

Con el objetivo de simplificar cálculos, las calidades de los diferentes haces y las cantidades que dependen de las mismas se expresan en términos de la profundidad de hemiabsorción (R_{50}).

2.5.1 Cámaras de Ionización

El código establece la utilización obligatoria de cámaras de ionización plano-paralelas (Véase Figura 2.15) para calidades $R_{50} < 4 \text{ g/cm}^2$ y su uso es recomendado para todas las calidades de haz, por lo que, para calidades de haces mayores a la mencionada anteriormente se podrían utilizar cámaras cilíndricas.



Figura 2. 15. Cámara de ionización plano-paralela modelo PTW.

Para el caso de las cámaras plano-paralelas se toma el punto de referencia en la superficie interna de la ventana de entrada, en el centro de la misma. El punto de referencia debe colocarse en el punto de interés en el maniquí.

Para el caso de las cámaras cilíndricas, el punto de referencia se toma en el eje de la cámara en el centro del volumen de la cavidad. Para mediciones en haces de electrones, el punto de referencia debe colocarse a una distancia $0,5 r_{cyl}$ más profunda que el punto de interés en el maniquí, donde r_{cyl} es el radio de la cavidad de aire.

2.5.2 Maniquíes

El agua es el medio de referencia recomendado para las medidas en haces de electrones. La recomendación que se presenta es que el maniquí de agua debe sobrepasar por lo menos en 5 cm los cuatro lados de mayor tamaño de campo utilizado a la profundidad de medida así como también debe sobrepasar un mínimo de 5 g/cm^2 más allá de la máxima profundidad de medida.



Figura 2. 16. Maniquí de agua para mediciones automáticas de distribución de dosis modelo MP3-M.

2.5.3 Índice de Calidad de haz

El índice de calidad de haz que se utiliza para haces de electrones es la profundidad de hemiabsorción en agua, R_{50} . “Este valor es la profundidad en agua para la cual la dosis absorbida es el 50% de la dosis absorbida máxima, medida bajo condiciones de referencia”. [10]

La calidad de haz solía especificarse en términos de energía (E_0). El cambio obedece a una simplificación en cálculos que evita una conversión a energía.

Cuando se realizan mediciones con la cámara de ionización, la magnitud que se registra es el 50% de la distribución de ionización en profundidad en agua, $R_{50,ion}$. Es decir, “ $R_{50,ion}$ representa la profundidad en agua para la cual la corriente de ionización es el 50% de su valor máximo”. [10]

R_{50} se calcula utilizando las siguientes expresiones:

$$R_{50} = 1,029 R_{50,ion} - 0,06 \text{ g/cm}^2 \quad (R_{50,ion} < 10 \text{ g/cm}^2) \quad (2.1)$$

$$R_{50} = 1,059 R_{50,ion} - 0,37 \text{ g/cm}^2 \quad (R_{50,ion} > 10 \text{ g/cm}^2) \quad (2.2)$$

Una vez obtenido R_{50} , se procede a calcular la profundidad de referencia mediante la siguiente ecuación.

$$Z_{ref} = 0,6 R_{50} - 0,1 \text{ g/cm}^2 \quad (R_{50} \text{ en g/cm}^2) \quad (2.3)$$

Para haces de calidad $R_{50} < 4 \text{ g/cm}^2$ la profundidad de referencia está próxima a la profundidad del máximo de dosis absorbida mientras que para calidades superiores es más profunda. Esta nueva profundidad de referencia reduce de manera significativa las variaciones de los factores de calibración de la cámara y su uso se justifica por la exactitud ganada especialmente para cámaras plano-paralelas.

2.5.4 Distribuciones de dosis en profundidad en el eje central

La medida de una distribución de dosis en profundidad en el eje central debe seguir el procedimiento para la medida de R_{50} . Cuando se usa una cámara de ionización, la distribución de ionización en profundidad medida debe convertirse en distribución de dosis en profundidad. Para un haz de calidad R_{50} , esto se hace multiplicando la corriente de ionización, o la carga, en cada profundidad (z) de medida, por la razón de poderes de frenado, $S_{w,air}$, en esa profundidad. El TRS 398 tabula una serie de valores de $S_{w,air}$ en función de R_{50} y de la profundidad relativa z/R_{50} . Es suficiente con la interpolación lineal entre los datos de la tabla.

El procedimiento omite cualquier variación del factor de perturbación con la profundidad. Esta es una buena aproximación para las cámaras plano-paralelas con buen anillo de guarda. Para las cámaras plano-paralelas que no disponen de un buen anillo de guarda y para las cámaras cilíndricas, los cambios en el factor de perturbación son significativos y deben tenerse en cuenta.

2.5.5 Determinación de dosis absorbida

La dosis absorbida en agua viene dada por

$$D_{w,Q} = M_Q N_{D,w,Q_0} k_{Q,Q_0} \quad (2.4)$$

Donde M_Q es el conjunto de medidas realizadas a la profundidad de referencia y corregidas por presión y temperatura, por polarización y por recombinación de iones. N_{D,w,Q_0} es el factor de calibración de la cámara en términos de dosis absorbida en agua y calidad de referencia Q_0 y finalmente k_{Q,Q_0} es el factor específico para la cámara que corrige por la diferencia que hay entre la calidad Q_0 del haz de referencia con el que fue calibrada la cámara y la calidad del haz del usuario Q .

2.6 ALGORITMO DE HAZ DE LÁPIZ GAUSSIANO GENERALIZADO

El algoritmo de haz de lápiz gaussiano generalizado (GGPB) es el usado por el sistema de planificación Eclipse actualmente para el tratamiento con haces de electrones en el servicio de radioterapia del HCC. Las medidas que se realizarán en el presente trabajo son para alimentar dicho algoritmo, por lo que es importante conocer los antecedentes, los fundamentos teóricos y las limitaciones del mismo.

Los electrones interactúan con la materia de manera diferente a los fotones, su absorción es muy rápida en agua y la dispersión lateral es mucho mayor, por lo que las distribuciones tienen la forma clásica de gota. Además tienen componente de contaminación fotónica que se genera en la cabeza del acelerador como en el propio paciente.

Los primeros métodos para computar la dosis de un haz de electrones estuvieron basados en funciones empíricas, para las cuales se utilizaban geometrías de rayos lineales, asumiendo distribuciones de dosis amplias. Estos métodos se basan en datos experimentales con los que se trata de obtener una representación matricial o funciones generadoras que permitan obtenerlas. Se parte de un número limitado de datos y se interpola el resto. También se incorporaron correcciones por inhomogeneidades, utilizando los datos de la transmisión medida con losas de diferentes heterogeneidades. La mayor limitación de estos métodos es que no permitían predecir los efectos de los campos pequeños sobre la distribución de dosis, incidencia oblicua del haz, pequeñas inhomogeneidades o cambios repentinos en la superficie a tratar. [11]

Se desarrolló una mejora de los métodos empíricos basados en la ecuación propuesta por Kawachi [12] en la década de los 70. A pesar de esta mejora, con la cual los algoritmos son capaces de utilizar haces de lápiz derivados semi-empíricamente que pueden situarse a lo largo de la superficie para predecir los efectos de campos pequeños e irregularidades de la superficie, su exactitud para calcular la corrección por inhomogeneidades es bastante limitada. Usan longitudes de camino efectivas entre la fuente virtual y el punto de cálculo pero, no se toman en cuenta del todo los efectos de heterogeneidades anatómicas en tejidos pequeños de forma tridimensional.

A principio de los 80 se llevan a cabo avances importantes en la planificación de tratamiento para haces de electrones. Los investigadores regresan a un planteamiento más físico y se proponen analizar mecanismos de dispersión múltiple de los electrones primarios debido a la necesidad de encontrar modelos que permitan predecir el comportamiento de un haz de electrones en presencia de heterogeneidades. Se desarrollaron métodos basados en haz de lápiz de distribuciones gaussianas calculados mediante la aplicación de la teoría de dispersión múltiple de Fermi-Eyges. [13][14][15]

Asumiendo la aproximación de dispersión múltiple para ángulos pequeños, un haz de lápiz elemental que penetra un medio dispersor se aproxima muy bien a una gaussiana en su dispersión lateral para todas las profundidades. También pueden ocurrir dispersiones para ángulos grandes que causarían una desviación de una distribución gaussiana pura, pero el efecto general sobre la distribución de dosis se considera despreciable.

La distribución de dosis espacial para un haz de lápiz gaussiano puede ser representado por:

$$d_p(r, z) = d_p(o, z)e^{-r^2/\sigma_r^2(z)} \quad (2.5)$$

Donde $d_p(r, z)$ es la contribución de dosis por el haz de lápiz en un punto a una distancia radial r al eje central y profundidad z , $d_p(o, z)$ es la dosis axial y $\sigma_r^2(z)$ es la media cuadrada del desplazamiento radial de los electrones como resultado de la dispersión múltiple de coulomb.

La función exponencial en la ecuación anterior representa la tasa fuera del eje para un haz de lápiz, normalizado a ser uno cuando $r = 0$.

Se puede mostrar que $\sigma_r^2 = 2\sigma_x^2 = 2\sigma_y^2$ donde σ_x^2 y σ_y^2 son la media cuadrada del desplazamiento lateral proyectados en los planos X,Z y Y,Z respectivamente.

Otra manera útil de expresar la ecuación anterior es:

$$d_p(r, z) = D_\infty(o, z) \frac{e^{-r^2/\sigma_r^2(z)}}{\pi\sigma_r^2(z)} \quad (2.6)$$

Donde $D_\infty(o, z)$ es la dosis a la profundidad z en un campo infinitamente ancho con la misma fluencia incidente en la superficie que el haz de lápiz. La función de distribución

gaussiana en la ecuación anterior está normalizada para que el área integral de la función sobre un plano trasverso a la profundidad z sea uno. En coordenadas cartesianas la ecuación se escribe de la siguiente forma.

$$d_p(x, y, z) = D_\infty(0, 0, z) \frac{e^{-\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2}{2\pi\sigma^2(x', y', z)}}}{2\pi\sigma^2(x', y', z)} \quad (2.7)$$

Donde $d_p(x, y, z)$ es la contribución de dosis en un punto (x, y, z) por un haz de lápiz cuyo eje central pasa a través de (x', y', z) .

La distribución de dosis total en un campo de cualquier tamaño y forma puede calcularse sumando todos los haces de lápiz.

$$D_{(x,y,z)} = \iint d_p(x - x', y - y', z) dx' dy' \quad (2.8)$$

La integración de una función gaussiana dentro de límites finitos no puede hacerse de forma analítica. Para evaluar esta función se necesita usar una función de error. Los cálculos de convolución muestran que para un haz de electrones de sección transversal rectangular ($2a \times 2b$), la distribución espacial de dosis viene dada por:

$$D_{(x,y,z)} = D_\infty(0, 0, z) \frac{1}{4} \left(\operatorname{erf} \frac{a+x}{\sigma_r(z)} + \frac{a-x}{\sigma_r(z)} \right) \left(\operatorname{erf} \frac{a+y}{\sigma_r(z)} + \frac{a-y}{\sigma_r(z)} \right) \quad (2.9)$$

Donde la función de error está definida por

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (2.10)$$

La función de error está normalizada para que sea uno al evaluarse en el infinito. [5][10]

2.6.1 Dispersión lateral, σ

La función gaussiana está caracterizada por el parámetro de dispersión lateral σ , que es similar al parámetro de desviación estándar de una función de distribución normal

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (2.11)$$

La distribución de dosis en un haz de lápiz de electrones incidentes sobre un maniquí uniforme tiene forma de gota o cebolla. El parámetro de dispersión lateral incrementa con la

profundidad hasta un punto donde la dispersión es máxima, más allá de esa profundidad hay una pérdida precipitada de electrones debido a que la excursión lateral los hace perder toda su energía.

Eyges predijo el parámetro σ teóricamente expandiendo la teoría de dispersión múltiple para ángulos pequeños de Fermi, ajustándola a una geometría de losas de cualquier composición. Considerando $\sigma_x(z)$ en el plano X,Z:

$$\sigma_x^2(z) = \frac{1}{2} \int \left(\frac{\theta^2}{\rho l} (z') \right) \rho(z') (z - z')^2 dz' \quad (2.12)$$

Donde $\theta^2/\rho l$ es el poder de dispersión angular másico y ρ es la densidad del maniquí de losas. [16]

Hay limitaciones para la ecuación propuesta por Eyges. Según la ecuación, el parámetro σ aumenta indefinidamente con la profundidad y esto, es contrario a lo observado experimentalmente para una distribución de dosis debida a un haz estrecho. La ecuación está basada en dispersiones coulombianas múltiples para ángulos estrechos e ignora la probabilidad de dispersiones debida a ángulos grandes. Estos resultados terminan en una sub estimación de σ . Sin embargo, a partir de 1981 se lleva a cabo la implementación práctica del algoritmo y como consecuencia es adoptado por muchos sistemas de planificación de tratamiento comerciales. [4]

Una alternativa para solucionar las limitaciones del modelo, se planteó con la propuesta de representar el perfil de dosis en cada profundidad como una suma de tres distribuciones gaussianas en vez de una, pesadas de forma conveniente para expresar la parte radial de la distribución de dosis absorbida del haz de lápiz.

2.6.2 Haz de Lápiz Gaussiano Generalizado (GGPB)

El algoritmo de haz de lápiz gaussiano generalizado (GGPB) se desarrolló originalmente en Estocolmo en el Instituto Karolinska por Lax y colaboradores. Luego se actualiza para calcular campos de tratamientos de forma arbitraria con factores de corrección de heterogeneidades en dos dimensiones.

El GGPB se basa en la teoría de dispersión múltiple de Fermi-Eyges. El algoritmo calcula distribuciones de dosis radiales como la suma de tres funciones gaussianas, tomando en cuenta la dispersión múltiple por ángulos grandes y la dispersión del alcance. El modelo del haz permite utilizar campos de tratamiento de forma irregular, rotaciones del colimador y campos no coplanares. La exactitud de cálculo para campos de electrones en material inhomogeneo es de +/- 5% o +/- 5mm. [17]

En la implementación tridimensional del algoritmo GGPB, se utiliza la suma de tres gaussianas. La integración de dosis se reemplaza con una suma de grupos de haces de lápiz cuadrados que se distribuyen uniformemente a través de todo el campo de tratamiento. Las dimensiones de los haces de lápiz son 2,5 x 2,5 mm a la distancia de tratamiento estándar y ajustadas a la distancia del plano de referencia. Para tomar en cuenta la dispersión en aire, se incluyen en el cálculo los haces de lápiz que están fuera del campo. El número de estos haces de lápiz se calcula utilizando el valor medio cuadrático del ángulo de dispersión de los electrones en el plano de referencia y la distancia desde el plano de referencia hasta el objeto.

El conjunto de haces de lápiz se trazan a través de la matriz tridimensional de densidad electrónica hasta la profundidad máxima. Los coeficientes para computar la forma del haz de lápiz y el valor de dosis en profundidad relativo ajustados para tomar en cuenta las inhomogeneidades se computan con una variación en profundidad variable con la energía que puede ir de 1 mm por debajo de 10 MeV hasta 3,5 mm por encima de 35 MeV. La densidad electrónica también es evaluada bajo los mismos incrementos de profundidad.

La contribución de dosis de cada haz de lápiz es sumada en el punto de cálculo de la matriz representando un plano (transversal, sagital o frontal) en el objeto. Para aumentar la velocidad de cálculo, las integrales de las funciones gaussianas se calculan usando un conjunto de valores de funciones error pre calculadas con anterioridad. Además los cálculos de dosis evitan tomar en cuenta puntos cuya localización sea muy lejana de la incidencia del haz y más profundos que el máximo rango establecido.

Finalmente, la contribución por bremsstrahlung se añade a la distribución de dosis como se hace para un campo de fotones utilizando el cálculo de porcentaje de dosis en profundidad para bremsstrahlung y la información del perfil de dosis. Para el caso de bremsstrahlung no se hacen correcciones por inhomogeneidad.

De este modo y tras utilizar en la formación de los haces de lápiz, las tres gaussianas, la expresión de la dosis absorbida para un haz ancho de tamaño A, queda:

$$D(x, y, z) = \frac{D_o(\infty, z) \sum_{n=1}^3 B_n(z) \iint_A S_{air}(x', y', z) e^{-\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2}{b_n(z) \bar{r}^2(z) \rho(z)}} dx' dy'}{\pi \bar{r}^2 \rho(z) \sum_{n=1}^3 B_n(z) b_n(z)} \quad (2.13)$$

Donde B_n y b son los coeficientes de peso de amplitud y anchura de las gaussianas respectivamente y dependen de la profundidad y de la energía. Por consiguiente, lo importante para poder usar el modelo es tener dichos coeficientes y para obtenerlos lo más conveniente es ajustarlos a distribuciones de energía depositada para haces de lápiz mono energéticos y mono direccionales calculados previamente por Monte Carlo. [11]

Físicamente S_{air} representa la fluencia de electrones en la posición Z en aire cuando no existe material alguno bajo el colimador.

2.7 CÁLCULO MANUAL DE UNIDADES MONITOR PARA TRATAMIENTOS CON HACES DE ELECTRONES

El cálculo de unidades monitor (MU) ha evolucionado a través de los años a medida que la planificación de tratamiento ha incrementado en complejidad y precisión. Históricamente las unidades monitor eran determinadas a través de cálculos manuales, basados en datos recolectada al momento del comisionamiento del equipo y utilizando maniqués de agua.

A pesar de las mejoras en el cálculo computarizado de unidades monitor que se utilicen actualmente, todavía se requiere del cálculo manual de unidades monitor por varias razones. Una de las más sobresalientes es el hecho de que no todos los pacientes requieren de una planificación de tratamiento computarizada y es mucho más eficiente realizar un cálculo manual; esta situación es bastante común en tratamientos paliativos o emergencias. Por otra parte, a pesar de que el cálculo computarizado incorpora información adicional, no es una garantía de que el cálculo de unidades monitor computarizado es más acertado para cualquier condición.

El grupo de trabajo 40 y el 114 de la Asociación Americana de Físicos en Medicina (AAPM) recomiendan que el resultado del cálculo computarizado sea verificado

independientemente con un método de cálculo alternativo. Dicha verificación se vuelve mucho más importante a medida que incrementa la sofisticación del algoritmo de planificación.

En este trabajo se utilizará el protocolo publicado por el grupo de trabajo número 71 de la AAPM para cálculo de unidades monitor para tratamientos con fotones y electrones. [18]

2.7.1 Cálculo de Unidades Monitor (MU)

La expresión para el cálculo de unidades monitor para el tratamiento con electrones utilizando una distancia fuente superficie (SSD) estándar, se presenta a continuación:

$$MU = \frac{D \cdot 100\%}{D'_0 \cdot PDD(d, r_a, SSD_0) S_e(d, r_a, SSD_0)} \quad (2.14)$$

Donde D es la dosis de prescripción. El PDD está normalizado a la profundidad de máxima dosis para el tamaño de campo de tratamiento y S_e es el factor de salida para un tamaño de campo r_a . El término de porcentaje de dosis en profundidad se incluye para permitir la práctica común de prescribir la dosis a un punto diferente al de profundidad de dosis máxima en el eje central.

2.7.2 Factores de Salida (S_e)

Al momento del comisionamiento del haz, se mide la dependencia del tamaño de campo con la salida como una función de tamaño de campo para cada combinación de cada una de las energías y los aplicadores en la distancia fuente superficie de referencia y a una distancia de profundidad de dosis máxima de referencia d_m . En el caso de que el aplicador se le pueda colocar inserto, la medida de la salida se hace para un rango de insertos cuadrados que va desde $2 \times 2 \text{ cm}^2$ hasta el tamaño del aplicador completamente abierto.

El factor de salida para electrones, S_e fue definido por el grupo de trabajo número 70 de la AAPM como:

$$S_e(r_a, SSD) = \frac{D'(d_m(r_a), r_a, SSD)}{D'_o} \quad (2.15)$$

Donde D' es la dosis por unidad monitor, $d_m(r_a)$ es la profundidad de máxima dosis para el tamaño de campo de tratamiento r_a y D'_o es la dosis por unidad monitor bajo condiciones de normalización. El factor de salida incluye efectos de aplicador de inserto y de distancias de tratamiento.

La Dosis por MU bajo condiciones de normalización (D'_o) se establece dentro del protocolo a ser 1 cGy/MU.

Para campos de tratamiento rectangulares, donde el tamaño de inserto tiene medidas dadas (LxW) se debe utilizar el método de la raíz cuadrada de Mills para obtener el factor de salida del campo rectangular, mediante la ecuación se presenta a continuación:

$$S_e(r_a, L \times W) = \sqrt{S_e(r_a, L \times L) \cdot S_e(r_a, W \times W)} \quad (2.16)$$

A continuación, la Tabla 2.1 presenta una serie de valores medidos de factores de salida para un haz de electrones de 9 MeV para diferentes tamaños de campo y diferentes aplicadores publicada por el grupo de trabajo N° 71 de la AAPM.

Tamaño de Campo (cm²)	Tamaño del Aplicador (cm²)			
	10x10	15x15	20x20	25x25
2x2	0.843	0.846	0.824	0.812
3x3	0.908	0.908	0.891	0.871
4x4	0.963	0.954	0.936	0.911
5x5	0.991	0.982	0.962	0.936
6x6	1.003	0.997	0.976	0.951
7x7	1.005	1.004	0.983	0.960
8x8	1.003	1.006	0.986	0.964
10x10	1.000	1.003	0.985	0.965
12x12		0.997	0.980	0.962

15x15	0.992	0.976	0.955
20x20		0.981	0.950
25x25			0.955

Tabla 2. 1. Factores de Salida de electrones en función del tamaño de campo para diferentes aplicadores para un haz de 9 MeV (utilizando una SSD=100cm).

2.7.3 Cálculos para una distancia fuente superficie extendida.

La definición de factor de salida incluye efectos asociados a distancias de tratamiento, por ende, las unidades monitor pueden ser calculadas reemplazando el término de distancia fuente superficie estándar en la expresión anterior y colocando en su lugar el valor de distancia fuente superficie extendida. Sin embargo en la práctica, la recomendación es separar los efectos de tamaño de campo de los efectos de distancias de tratamiento. Usualmente el factor de salida se tabula en función de tamaños de aplicador e insertos a una distancia fuente superficie estándar. El efecto de la distancia de tratamiento que difiere de la estándar puede ser tomado en cuenta de dos formas diferentes que se presentan en las expresiones a continuación.

2.7.4 Técnica SSD Efectiva (SSD_{eff})

$$MU = \frac{D \cdot 100\%}{D'_o \cdot PDD(d, r_a, SSD) \cdot S_e(r_a, SSD_o) \left(\frac{SSD_{eff}(r) + d_o}{SSD_{eff}(r) + d_o + g} \right)^2} \quad (2.17)$$

Donde g representa la diferencia entre la SSD de tratamiento y la SSD de calibración, y SSD_{eff} es la distancia fuente superficie efectiva para un tamaño de campo dado y es dependiente de la energía y del tamaño de campo.

SSD_{eff} puede utilizarse para calcular las MU para campos de electrones a distancias diferentes a la SSD estándar.

Khan [4] recomendó un método que se aproxima de manera muy cercana a la situación clínica, En este método se miden dosis en un maniquí a la profundidad del máximo (d_{max}), con

el maniquí colocado a una SSD estándar (gap igual a cero) y luego a varias distancias hasta a 20 cm más allá del final del aplicador. Si suponemos f = SSD efectiva, I_o = Dosis medida cuando el gap es igual a cero y I_g = Dosis medida con un gap (g), entonces por la Ley del inverso cuadrado de la distancia tenemos:

$$\frac{I_o}{I_g} = \left(\frac{f+d_m+g}{f+d_m} \right)^2 \quad (2.18)$$

o lo que sería lo mismo

$$\sqrt{\frac{I_o}{I_g}} = \frac{g}{f+d_m} + 1 \quad (2.19)$$

Si graficamos $\sqrt{\frac{I_o}{I_g}}$ como función de g se obtiene una recta cuya pendiente es $\frac{1}{f+d_m}$

Por lo que la SSD efectiva viene dada por la ecuación:

$$SSD_{eff} = \frac{1}{pendiente} - d_m \quad (2.20)$$

Para un tamaño de aplicador dado, existe una dependencia fuerte entre la SSD_{eff} y el tamaño de inserto, algunos estudios han demostrado que la dependencia de la SSD_{eff} con el aplicador no es muy fuerte por lo que las tablas de SSD_{eff} en función de tamaños de insertos se consideran adecuadas para la práctica clínica.

La tabla 2.2 muestra un conjunto de medidas del parámetro de SSD_{eff} para diferentes tamaños de inserto y para diferentes energías de electrones, publicada por el grupo de trabajo N° 71 de la AAPM.

Tamaño de Inserto (cm²)	Energía (MeV)				
	6	9	12	16	20
4	46,2	61,1	72,5	76,4	76,6
6	62,2	74,7	80,2	81,8	80,6
8	77,6	83,8	83,2	83,6	82,7
10	82,9	85,9	86,8	85,5	83,8
15	90,7	90,9	90,1	90,0	89,7

20	90,0	91,8	91,4	90,9	92,0
25	90,7	91,9	91,0	92,5	93,3

Tabla 2. 2. *SSDeff promediada para cada aplicador para un acelerador Varian 2100.*

2.7.5 Técnica de Air-gap

$$MU = \frac{D \cdot 100\%}{D'_o \cdot PDD(d, r_a, SSD) \cdot S_e(r_a, SSD_o) \left(\frac{SSD_o + d_o}{SSD_o + d_o + g} \right)^2 f_{air}(r_a, SSD)} \quad (2.21)$$

Donde g es la diferencia entre la SSD de tratamiento y la SSD de calibración y f_{air} es el factor de corrección pro air-gap para un tamaño de campo dado y SSD estándar. f_{air} depende del tamaño de inserto y de la SSD.

f_{air} se calcula mediante la siguiente ecuación utilizando datos de factores de salida para campos cuadrados a SSD estándar y extendidas.

$$f_{air}(r_a, SSD) = \frac{D'(r_a, SSD)}{D'(r_a, SSD_o)} \left[\frac{SSD + d_m(r_a)}{SSD_o + d_m(r_a)} \right]^2 \quad (22)$$

$D'(r_a, SSD)$ es la salida medida en una SSD dada.

Para calcular el f_{air} para campos rectangulares se utiliza el método de la raíz cuadrada de Mills que se explicó anteriormente.

A continuación, la tabla 2.3 muestra los valores obtenidos de f_{air} para diferentes tamaños de campo y diferentes valores de distancia fuente superficie, publicados por el grupo de trabajo N° 71 de la AAPM.

Tamaño de Campo (cm²)	SSD (cm)				
	100	105	110	115	120
2x2	1,000	0,882	0,743	0,611	0,505
3x3	1,000	0,946	0,878	0,792	0,715
4x4	1,000	0,942	0,902	0,862	0,815
6x6	1,000	0,978	0,954	0,940	0,915

10x10	1,000	0,984	0,972	0,961	0,955
15x15	1,000	0,988	0,978	0,970	0,963
20x20	1,000	0,987	0,975	0,971	0,963
25x25	1,000	0,987	0,982	0,974	0,970

Tabla 2. 3. Factores de air-gap en función del tamaño de campo definido a una SSD=100 cm y SSD para un haz de electrones de 9 MeV.

CAPÍTULO 3

MATERIALES Y EQUIPOS

3.1 ACELERADOR LINEAL (LINAC)

Para la realización del presente trabajo se utilizó el acelerador lineal Trilogy del Servicio de Radioterapia del Hospital de Clínicas Caracas (HCC) y el Sistema de Planificación de Tratamiento (SPT) Eclipse, Versión 10.0. El acelerador dispone de dos energías de fotones (6 MV y 18 MV) y 6 energías de electrones (4, 6, 9, 12, 15 y 18 MeV).

- Marca y Fabricante: Varian Medical Systems Inc.
- Modelo: Trilogy, Serial: #1091

El software del acelerador presenta seis conjuntos de operación. Tres se utilizan en la práctica clínica y permiten probar la operación del acelerador diariamente y administrar tratamiento: Pruebas matutinas, Clínico y Procedimientos Especiales. Además cuenta con tres modos técnicos: Modo Servicio, Físico y de Comunicaciones que se utilizan para procedimientos técnicos, de mantenimiento y de servicio al equipo.

3.2 MANIQUÍ

MP3 Tanque de Agua: Sistema dosimétrico Tridimensional para medidas de distribuciones de dosis y análisis del haz de Radioterapia.

Características:

- Dimensiones internas: Longitud: 596 mm, ancho: 594 mm, altura: 502 mm.
- Cuenta con tres motores mecánicos para el posicionamiento del detector, el cual puede moverse a una velocidad de 50 mm/s con una exactitud de posicionamiento de $\pm 0,1$ mm.

- Reservorio de agua motorizado, ajustable al tanque de agua MP3, el cual permite llenar y vaciar el tanque con gran precisión.
- Software MEPHYSTO mc² para la adquisición, procesamiento y análisis de datos medidos.

3.3 DETECTORES

3.3.1 Cámara de ionización plano-paralela para medidas de electrones.

- Marca: PTW, modelo: ROOS 34001
- Serial: 0912

La ROOS 3401 es una cámara plano paralela a prueba de agua, utilizada para dosimetría absoluta en haces de electrones y protones de alta energía. (Véase Figura 3.1)

Características

- Volumen sensible nominal de 0,35cm³
- El punto de referencia se encuentra en el centro de la cámara a 1,12 mm debajo de la superficie y la dirección de incidencia del haz debe ser perpendicular a la cámara
- Respuesta Nominal de 12 nC/Gy
- El voltaje nominal de la cámara es de 200 V y el máximo es de 400 V
- Tiene un efecto de polaridad < 0,5%



Figura 3. 1. Cámara de ionización plano paralela modelo ROOS 3401.

3.3.2 Cámara de ionización para medidas de fotones y electrones.

- Marca: PTW, Modelo: SEMIFLEX 31010
- Serial 04071

Las cámaras semiflex son cámaras de ionización cilíndricas, se diseñan principalmente para medidas de distribuciones de dosis en maniquíes de agua motorizados, tienen un rango de energía nominal útil desde 140 kV hasta 50 MV para fotones y de 10 a 45 MeV para electrones. El diámetro interno es de 5,5 mm y su volumen sensible es de $0,125 \text{ cm}^3$



Figura 3. 2. Cámara de ionización cilíndrica modelo SEMIFLEX 31010.

3.3.3 Diodo semiconductor estereotáctico de PTW

- Modelo: TN 60017, Serial: 0076

El diodo dosimétrico 60017 es ideal para mediciones de dosis en campos pequeños de electrones y fotones. Tiene una excelente resolución espacial que hace posible medir en forma bastante precisa los perfiles de dosis incluso en la zona de penumbra de campos pequeños. Su uso es recomendado para mediciones de dosis en todos los campos de electrones y en campos de fotones de tamaño menor a $10 \times 10 \text{ cm}^2$. Puede usarse en maniquíes sólidos, de agua o en aire. (Véase Figura 3.3)

Características

- Es un diodo de silicio tipo p
- Volumen sensible nominal es de $0,03 \text{ mm}^3$
- El punto de referencia está en el eje del detector a 1,33 mm desde la punta del detector
- La dirección de incidencia del haz es axial
- La respuesta nominal es de 9 nC/Gy
- La dependencia de la respuesta con la temperatura es $\leq 4\%/K$
- Respecto a la dependencia de la respuesta con la energía; a profundidades mayores a d_{max} , las curvas de PDD medidas coinciden con las medidas con una cámara de ionización dentro de un margen de error de 0,5%
- No requiere voltaje de polarización



Figura 3. 3. Diodo semiconductor modelo TN 60017.

3.4 ELECTRÓMETRO

- Marca: PTW, Modelo: TANDEM T10015
- Marca: PTW, Modelo: UNIDOS E 10010



Figura 3. 4. *Electrómetros modelo TANDEM y modelo UNIDOS.*

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

De manera de cumplir con los objetivos propuestos en este trabajo, se realizó un procedimiento experimental que se describe a continuación.

Inicialmente, se tomaron las medidas de los PDD para los haces de electrones de las distintas energías. A partir de las curvas medidas y utilizando el software MEPHYSTO se obtuvo el índice de calidad R_{50} el cual es necesario para realizar el cálculo de la profundidad Z_{ref} . Es importante conocer el valor de Z_{ref} ya que, es en esta posición donde se colocaría el detector para registrar las lecturas de dosis.

Luego de conocer Z_{ref} se colocó el detector en posición y se registraron las lecturas de factores de salida para un haz de electrones de 9 MeV utilizando diferentes aplicadores desde 6×6 hasta $25 \times 25 \text{ cm}^2$ y utilizando insertos de diferentes tamaños cuadrados. Los valores de factores de salida obtenidos se normalizaron al valor obtenido para el aplicador $10 \times 10 \text{ cm}^2$ abierto y de esta forma poder comparar los datos medidos con los datos publicados por la Asociación Americana de Físicos en Medicina (AAPM) en su reporte 258 con la finalidad de validar la medición y cumplir con el primer objetivo presentado en este trabajo.

Luego se tomaron las medidas de los factores de salida para el resto de las energías utilizando también los aplicadores e insertos que se utilizaron anteriormente y se normalizaron los valores resultantes respecto al valor obtenido utilizando el aplicador de $15 \times 15 \text{ cm}^2$ abierto dado que este es el valor de normalización utilizado en el servicio de radioterapia del HCC. Una vez obtenidos los valores se introdujeron los valores al sistema de planificación eclipse y de esta forma cumplir con el segundo objetivo de este trabajo.

Se procedió a registrar medidas de carga para haces de electrones de diferentes energías utilizando los diferentes aplicadores disponibles abiertos y utilizando distancias fuente superficie extendidas. Con estas medidas y utilizando las expresiones presentadas en el marco

teórico se procedió a calcular los valores de distancia superficie efectiva (SSD_{eff}) para cada energía y aplicador para finalmente introducir estos parámetros al sistema de planificación de tratamiento. De esta manera completaríamos el cuarto objetivo de este trabajo.

Finalmente se planificaron varios casos pruebas utilizando diferentes aplicadores e insertos así como también diferentes energías y distancias fuente superficie extendidas en el sistema de planificación Eclipse; Además se realizaron cálculos puntuales para los mismos casos anteriores y se realizó la medición de dosis para cada uno de los planes. Con todos los datos recolectados se pudo realizar una comparación entre la dosis calculada por el planificador, la dosis calculada puntualmente y la dosis medida. De esta forma se cumple lo propuesto en el tercer y el quinto objetivo de este trabajo.

A continuación se presenta una descripción más detallada de cada una de las pruebas realizadas.

4.1 DETERMINAR R_{50} .

Para determinar R_{50} se posicionó el maniquí MP3 adecuadamente, centrándolo y alineándolo con el retículo del acelerador (Véase Figura 4.1), además se verificó la nivelación del tanque y se procedió a llenarlo. Finalmente se colocó a una distancia fuente superficie de 100 cm.



Figura 4. 1. Maniquí MP3 centrado y nivelado.

Se conectó el tanque MP3 al electrómetro tándem, se conectó la cámara plano-paralela como cámara principal y la cámara semiflex como cámara de referencia. Se posicionó la cámara plano paralela siguiendo el formalismo descrito en el marco teórico y la cámara semiflex se posicionó sobre el tanque a un extremo del tamaño de campo seleccionado y cuidando que estuviese dentro del campo. Se utilizó un aplicador abierto de $15 \times 15 \text{ cm}^2$.

Se conectó el electrómetro a la computadora con el software de MEPHYSTO y a través del programa se procedió a medir las curvas de porcentajes de dosis en profundidad. El software obtiene la curva de ionización en profundidad y mediante una herramienta permite convertir la curva a una de dosis (la base de esta conversión esta explicada en el marco teórico) y así reportar los valores de R_{50} y $d_{\max}$ entre otros valores de interés. Utilizando el valor de R_{50} obtenido y la ecuación (3), se calculó Z_{ref} .

El objetivo de esta prueba es determinar la profundidad de referencia (Z_{ref}), para poder conocer la profundidad en la cual se colocaría el detector al momento de medir los factores de salida.

4.2 ELECCIÓN DEL DETECTOR PARA MEDIR FACTORES DE SALIDA

Se posicionó el maniquí MP3 adecuadamente, siguiendo el retículo del acelerador y se niveló. Se llenó y se estableció la distancia fuente superficie de 100 cm en la superficie del agua. Se tomaron medidas de factores de salida para haces de electrones de 9 MeV usando el aplicador de $10 \times 10 \text{ cm}^2$ abierto y un inserto de $2 \times 2 \text{ cm}^2$. Esto se llevó a cabo usando la cámara plano-paralela y el diodo semiconductor. Se realizó el cociente del valor del factor de salida para el campo de $2 \times 2 \text{ cm}^2$ entre el valor obtenido para el campo de $10 \times 10 \text{ cm}^2$ y así se obtuvo el resultado de factor de salida medido con cada detector.

El objetivo de esta prueba fue determinar con cuál de los detectores se obtenía un porcentaje de error más bajo al comparar las mediciones realizadas con los resultados reportados por la AAPM en su reporte 258 para el tamaño de campo más pequeño ($2 \times 2 \text{ cm}^2$) y elegir cual sería el detector de uso para todas las mediciones de factores de salida del presente trabajo.

4.3 MEDIR FACTORES DE SALIDA PARA UNA ENERGÍA DE 9 MeV

Se posicionó el maniquí MP3 como en el caso anterior. Para esta prueba se utilizó el diodo semiconductor como detector para medir los factores de salida y se conectó al electrómetro Unidos. El diodo se posicionó en el isocentro del equipo justo por debajo de la superficie del agua (Véase Figura 4.2). Se seleccionó la energía de 9 MeV en el acelerador y se utilizó el cono de $10 \times 10 \text{ cm}^2$ (campo abierto) y se procedió a registrar la lectura bajo esta configuración. Luego se colocaron los diferentes insertos desde el 2×2 hasta el 8×8 y se registraron las lecturas tomadas para luego calcular el cociente entre las medidas tomadas con los insertos mencionados y la medida realizada con el campo abierto para obtener el factor de salida para cada inserto. Se repitió lo anterior para el resto de los conos (6×6 , 15×15 , 20×20 y $25 \times 25 \text{ cm}^2$).

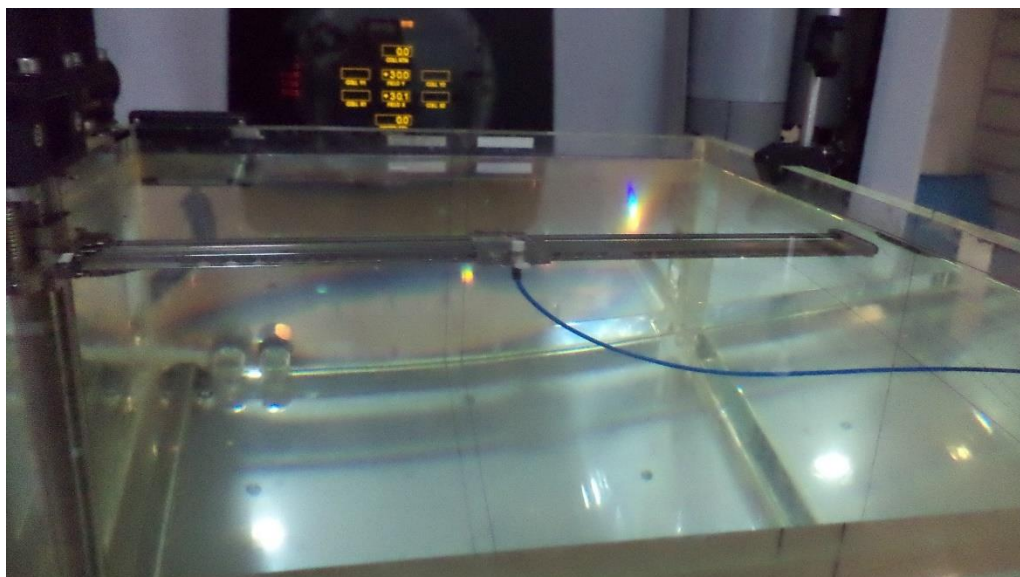


Figura 4. 2. Diodo posicionado en el maniquí MP3 para tomar medidas de factores de salida.

El objetivo de esta prueba fue determinar los factores de salida del acelerador utilizando electrones con una energía de 9 MeV y comparar los factores medidos con los factores publicados por el grupo de trabajo número 71 de la AAPM en su reporte 258 de manera de validar nuestro trabajo.

Los factores de salida publicados por la AAPM están normalizados al valor obtenido utilizando el aplicador de 10x10 cm² abierto, por lo que, los valores obtenidos en las mediciones se normalizarán de igual manera para poder establecer la comparación y luego se normalizarán al valor obtenido utilizando el aplicador de 15x15 cm² abierto, dado que, a ese valor esta normalizado actualmente en el sistema de planificación del Servicio de Radioterapia del HCC.

4.4 MEDIR FACTORES DE SALIDA PARA EL RESTO DE LAS ENERGÍAS DE ELECTRONES DEL ACCELERADOR

Al igual que en el caso anterior se realiza el mismo montaje del maniquí MP3, el diodo semiconductor y el electrómetro. Para esta prueba se registrarán los factores de salida medidos utilizando las energías de electrones de 4, 6, 12, 15 y 18 MeV para todos los conos (6x6, 10x10, 15x15, 20x20 y 25x25 cm²) y para cada uno de los insertos cuadrados disponibles en cada caso,

partiendo desde el inserto de tamaño $2 \times 2 \text{ cm}^2$ siguiendo el procedimiento explicado anteriormente

El objetivo de esta prueba es obtener los factores de salida para todas las energías disponibles del acelerador y poder introducir estos datos al sistema de planificación de tratamiento.

Dado que los factores de salida que se miden serán de campos cuadrados se aplicará la ecuación (16) para obtener los factores de salida para tamaños rectangulares. Los valores obtenidos se normalizaran respecto al valor de factor de salida usando un aplicador de $15 \times 15 \text{ cm}^2$ abierto.

4.5 INTRODUCIR DATOS DE LOS FACTORES DE SALIDA AL SISTEMA DE PLANIFICACIÓN DE TRATAMIENTO

Una vez obtenidos los factores de salida, se procedió a registrar los datos en el sistema de planificación Eclipse.

En el Eclipse, específicamente en la sección de Planificación de tratamiento, se encuentra habilitada una opción llamada configuración del haz, dentro de ella se va directamente a la interfaz donde se introducen los datos al sistema (Véase Figura 4.3). Estando en la interfaz se elige la máquina de tratamiento a la cual se le quiere editar o agregar datos. Cabe destacar que los datos recolectados en este trabajo no se introdujeron directamente en la matriz de datos que utiliza el equipo para dar tratamiento actualmente en el HCC.

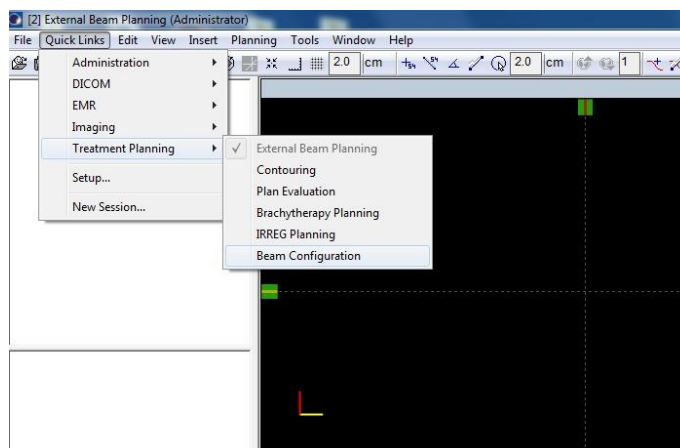


Figura 4. 3. Ubicación de la opción “Beam Configuration” dentro del Sistema de Planificación Eclipse.

En la interfaz de configuración del haz, se introdujo principalmente el nombre de la unidad de tratamiento que se planeaba configurar para luego agregar las energías disponibles del equipo y finalmente insertar los conos disponibles en cada parámetro de energía y luego insertar las tablas de factores de tamaño de campo (factores de salida) para cada cono. Finalmente, se le pidió al sistema que interpolara los valores faltantes en las tablas a partir de los valores de entrada medidos en los pasos anteriores de manera de tener una matriz de datos más completa.

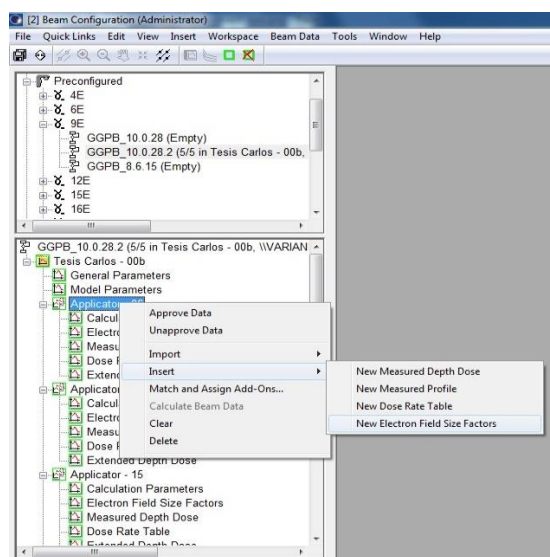


Figura 4. 4. Ejemplo de cómo insertar una nueva tabla de factores de salida para una energía de 9 MeV y aplicador de $6 \times 6 \text{ cm}^2$.

En esta interfaz también se insertaron las tablas de tasa de dosis (Dose Rate Table) y se estableció 100 MU/Gy para la configuración de campo abierto para cada cono y cada energía. Además se insertaron los datos correspondientes a las curvas de dosis en profundidad para campos abiertos y bloqueados.

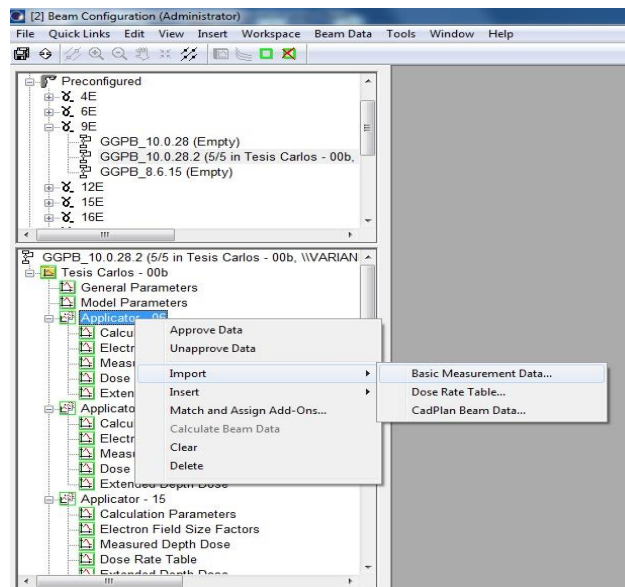


Figura 4. 5. Referencia de cómo importar las curvas de dosis en profundidad en el sistema de planificación Eclipse en la interfaz de configuración del haz.

El objetivo de esta tarea es alimentar el sistema de planificación de tratamiento con todos los datos medidos para luego generar un plan de tratamiento utilizando electrones y comparar la dosis calculada al entregar 200 unidades monitor por el sistema de planificación contra la dosis medida y contra la dosis calculada puntualmente mediante el método que explica el reporte 258 de la AAPM.

4.6 MEDIR LOS VALORES DE DISTANCIA FUENTE SUPERFICIE EFECTIVA (SSD_{EFF})

Se posicionó el maniquí MP3, el diodo semiconductor y el electrómetro de la misma forma que se hizo anteriormente. Se seleccionó cada una de las energías del equipo y se posicionó el diodo en la distancia de dosis máxima (d_{max}) respectiva para cada energía, de esta

forma se procedió a registrar las medidas de carga a una distancia fuente superficie de 100 cm y distancias fuente superficie extendidas de 110 y 120 cm. Estas medidas se hicieron para todos los conos (6x6, 10x10, 15x15, 20x20 y 25x25 cm²).

De la prueba 1 se obtuvo el parámetro de profundidad de dosis máxima.

Luego con los datos registrados se realizaron los gráficos necesarios (procedimiento explicado en el marco teórico) y utilizando la ecuación (20) se calcularon los valores de SSD_{eff} para cada energía y cada cono.

El objetivo de esta prueba es obtener los valores de SSD_{eff} para cada energía disponible del acelerador y para cada cono, de esta forma se pueden comparar los resultados obtenidos con los resultados publicados por la AAPM en su reporte 258 para las energías de 6, 9 y 12 MeV de manera de validar nuestro trabajo y obtener el valor de SSD_{eff} para el resto de las energías y conos respectivos para introducir todos los datos al sistema de planificación Eclipse.

4.7 INTRODUCIR DATOS DE SSD_{EFF} AL SISTEMA DE PLANIFICACIÓN DE TRATAMIENTO

Como en el caso de los factores de salida, para realizar esta tarea, fue necesario entrar en la interfaz de la configuración del haz, seleccionar la máquina de tratamiento adecuada y la energía específica, luego se seleccionó el aplicador y dentro del parámetro llamado parámetros de cálculo (Calculation Parameters) se seleccionó la opción llamada Distancia Virtual Fuente-Aplicador y se introdujo el valor medido de SSD efectiva para cada uno de los aplicadores y para cada una de las energías para las que se llevó a cabo la medición.

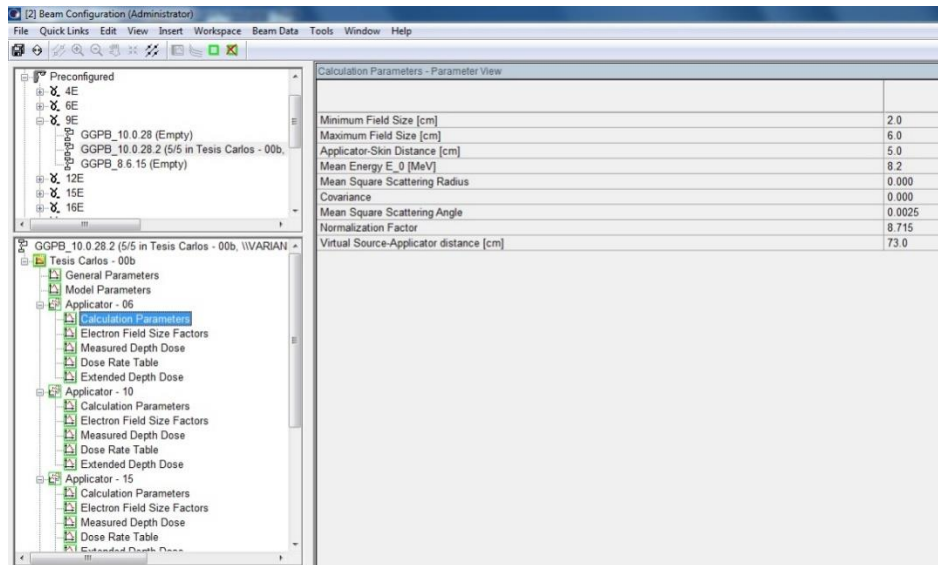


Figura 4. 6. Referencia de como introducir los parámetros de SSD efectiva dentro del sistema de planificación Eclipse.

El objetivo de esta prueba fue alimentar el sistema de planificación de tratamiento con los datos correspondientes a las SSD efectiva para poder realizar planes de tratamiento con una distancia fuente superficie extendida y comparar la dosis resultante con las obtenidas mediante cálculos puntuales y mediciones dosimétricas.

4.8 COMPARACIÓN DE DOSIS ENTRE SPT, CÁLCULO PUNTUAL Y DOSIMETRÍA

Después de ingresar los datos correspondientes a los factores de salida y la distancia fuente superficie efectiva en la interfaz de configuración del haz y aprobarla, se procedió a realizar planes de tratamiento que simularan casos clínicos y se registró la dosis resultante necesaria para entregar 200 unidades monitor por el sistema de planificación de tratamiento en la profundidad de dosis máxima ($d_{\max}$).

Para la energía de 9 MeV se realizaron tres insertos rectangulares diferentes por cada aplicador disponible, mientras que para el resto de las energías se realizó un inserto rectangular igual para cada aplicador. (Véase Figura 4.7)

Para comparar los casos de SSD efectiva se utilizaron tres insertos rectangulares y uno cuadrado, todos se planificaron con la utilización del aplicador de $15 \times 15 \text{ cm}^2$ y la energía de 9 MeV.



Figura 4. 7. Insertos de diferentes tamaños rectangulares para simular casos clínicos.

Se procedió a realizar el cálculo manual de dosis necesaria para entregar doscientas unidades monitor para cada uno de los casos clínicos mencionados anteriormente usando la expresión propuesta por el grupo de trabajo número 71 de la AAPM y también se realizó la dosimetría para cada caso y obtener la dosis medida por el detector (diodo semiconductor).

El objetivo de esta prueba es realizar una comparación entre la dosis resultante del cálculo realizado por el sistema de planificación de tratamiento, el cálculo puntual utilizando la ecuación propuesta por la AAPM y de la medición dosimétrica para evaluar la diferencia porcentual existente entre los resultados.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

5.1 DETERMINAR R_{50}

Los valores de R_{50} determinados y Z_{ref} calculados fueron los siguientes:

	<i>4 MeV</i>	<i>6 MeV</i>	<i>9 MeV</i>	<i>12 MeV</i>	<i>15 MeV</i>	<i>18 MeV</i>
<i>R_{50} (cm)</i>	1,25	2,31	3,53	5,07	6,26	7,38
<i>Z_{ref} (cm)</i>	0,65	1,28	2,02	2,94	3,65	4,33

Tabla 5. 1. Valores de R_{50} determinados usando el software MEPHYSTO y valores de Z_{ref} calculados.

Los valores de R_{50} obtenidos en calibraciones hechas al acelerador lineal en años anteriores fueron los siguientes:

<i>Año</i>		<i>4 MeV</i>	<i>6 MeV</i>	<i>9 MeV</i>	<i>12 MeV</i>	<i>15 MeV</i>	<i>18 MeV</i>
<i>2012</i>	<i>R_{50} (cm)</i>	1,26	2,35	3,60	5,14	6,32	7,51
<i>2014</i>	<i>R_{50} (cm)</i>	1,31	2,33	3,55	5,08	6,23	7,49

Tabla 5. 2. Valores de R_{50} obtenidos en las calibraciones del acelerador lineal en los años 2012 y 2014.

5.2 ELECCIÓN DEL DETECTOR

<i>Detector</i>	<i>Lectura 2x2 cm²</i>	<i>Lectura 10x10 cm²</i>	<i>Factor de Salida medido</i>	<i>Factor de Salida AAPM</i>	<i>% de diferencia</i>
Cámara Plano paralela	14,59	22,46	0,6941	0,843	18
Diodo	14,76	18,71	0,7751	0,843	6

Tabla 5. 3. Comparación de resultados del factor de salida para un campo 2x2 cm² usando una energía de electrones de 9 MeV medidos con una cámara plano paralela y un diodo semiconductor.

5.3 FACTORES DE SALIDA PARA ELECTRONES DE 9 MeV

Los valores de factores de salida medidos fueron los siguientes:

<i>Tamaño de Campo (cm²)</i>	<i>Aplicador (cm²)</i>			
	10x10	15x15	20x20	25x25
2x2	14,76	14,76	14,41	14,37
3x3	17,17	17,09	16,42	16,67
4x4	18,34	18,17	17,92	17,55
5x5	18,83	18,77	18,36	17,98
6x6	18,86	18,88	18,52	18,1
7x7	18,76	19	18,63	18,16
8x8	18,76	19	18,61	18,13
10x10	18,71	19	18,52	18,12
12x12		18,79	18,42	18,07
15x15		18,7	18,39	17,97
20x20			18,29	17,86
25x25				17,84

Tabla 5. 4. Valores de factores de salida medidos (sin normalizar) para un haz de electrones de 9 MeV.

Luego de normalizar los valores anteriores respecto al valor obtenido para el aplicador 10x10 cm² se obtuvo:

Tamaño de Campo (cm²)	Aplicador (cm²)			
	10x10	15x15	20x20	25x25
2x2	0,789	0,789	0,770	0,768
3x3	0,918	0,913	0,878	0,891
4x4	0,980	0,971	0,958	0,938
5x5	1,006	1,003	0,981	0,961
6x6	1,008	1,009	0,990	0,967
7x7	1,003	1,014	0,996	0,971
8x8	1,003	1,013	0,995	0,969
10x10	1,000	1,009	0,990	0,968
12x12		1,004	0,985	0,966
15x15		0,999	0,983	0,960
20x20			0,978	0,955
25x25				0,954

Tabla 5. 5. Factores de salida medidos para un haz de electrones de 9 MeV normalizados respecto al campo de 10x10 cm² y el aplicador de 10x10 cm²

Al comparar los valores de factores de salida medidos para un haz de electrones de 9 MeV con los valores reportados por la AAPM en su reporte 258 se obtuvieron las siguientes diferencias porcentuales:

Tamaño de Campo (cm²)	Aplicador (cm²)			
	10x10	15x15	20x20	25x25
2x2	-6,4	-6,8	-6,5	-5,4
3x3	1,1	0,6	-1,5	2,3
4x4	1,8	1,8	2,3	3,0
5x5	1,6	2,2	2,0	2,7
6x6	0,5	1,2	1,4	1,7
7x7	-0,2	1,0	1,3	1,1
8x8	0,0	0,7	0,9	0,5
10x10	0,0	0,6	0,5	0,4
12x12		0,7	0,5	0,4
15x15		0,8	0,7	0,6
20x20			-0,4	0,5
25x25				-0,2

Tabla 5. 6. Diferencia porcentual luego de comparar los factores de salida medidos para un haz de electrones de 9 MeV y los valores publicados por el grupo de trabajo número 71 de la AAPM para la misma energía.

A continuación se muestran los resultados de los factores de salida medidos para un haz de electrones de 9 MeV normalizados al valor medido utilizando un aplicador de 15x15 cm² abierto y que además incluye los valores obtenidos luego de utilizar la ecuación de Mills para calcular los valores de factores de salida para tamaños de campo rectangulares y los valores obtenidos luego de utilizar la interpolación del sistema de planificación de tratamiento.

Para el cono de 6x6 cm²

Tamaño de Campo (cm²)	2x2	3x3	4x4	5x5	6x6
2x2	0,7856	0,8466	0,8714	0,8825	0,8821
3x3	0,8466	0,9123	0,9391	0,9510	0,9505
4x4	0,8714	0,9391	0,9667	0,9790	0,9785
5x5	0,8825	0,9510	0,9790	0,9914	0,9909
6x6	0,8821	0,9505	0,9785	0,9909	0,9904

Tabla 5. 7. Factores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 9 MeV usando un aplicador de 6x6 cm² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm² y el aplicador de 15x15 cm²

Para el cono de 10x10 cm²

Tamaño de Campo (cm²)	2x2	3x3	4x4	5x5	6x6	7x7	8x8	9x9	10x10
2x2	0,7893	0,8513	0,8798	0,8915	0,8922	0,8898	0,8898	0,8890	0,8886
3x3	0,8513	0,9182	0,9489	0,9616	0,9623	0,9598	0,9598	0,9590	0,9585
4x4	0,8798	0,9489	0,9807	0,9938	0,9946	0,9919	0,9919	0,9910	0,9906
5x5	0,8915	0,9616	0,9938	1,0070	1,0078	1,0051	1,0051	1,0040	1,0037
6x6	0,8922	0,9623	0,9946	1,0078	1,0086	1,0059	1,0059	1,0050	1,0045
7x7	0,8898	0,9598	0,9919	1,0051	1,0059	1,0032	1,0032	1,0030	1,0018
8x8	0,8898	0,9598	0,9919	1,0051	1,0059	1,0032	1,0032	1,0030	1,0018
9x9	0,8890	0,9590	0,9910	1,0040	1,0050	1,0030	1,0030	1,0020	1,0010
10x10	0,8886	0,9585	0,9906	1,0037	1,0045	1,0018	1,0018	1,0010	1,0005

Tabla 5. 8. Factores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 9 MeV usando un aplicador de 10x10 cm² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm² y el aplicador de 15x15 cm²

Para el cono de 15x15 cm²

Tamaño de Campo (cm²)	2x2	3x3	4x4	5x5	6x6	7x7	8x8	9x9
2x2	0,7893	0,8493	0,8758	0,8901	0,8927	0,8948	0,8944	0,8940
3x3	0,8493	0,9139	0,9424	0,9577	0,9606	0,9628	0,9624	0,9620
4x4	0,8758	0,9424	0,9717	0,9876	0,9905	0,9928	0,9923	0,9910
5x5	0,8901	0,9577	0,9876	1,0037	1,0066	1,0090	1,0085	1,0080
6x6	0,8927	0,9606	0,9905	1,0066	1,0096	1,0120	1,0115	1,0110
7x7	0,8948	0,9628	0,9928	1,0090	1,0120	1,0144	1,0139	1,0130
8x8	0,8944	0,9624	0,9923	1,0085	1,0115	1,0139	1,0134	1,0120
9x9	0,9840	0,9620	0,9910	1,0080	1,0110	1,0130	1,0120	1,0120
10x10	0,8930	0,9610	0,9900	1,0070	1,0100	1,0120	1,0120	1,0110
11x11	0,8920	0,9590	0,9890	1,0050	1,0080	1,0110	1,0100	1,0090
12x12	0,8906	0,9583	0,9881	1,0042	1,0072	1,0096	1,0091	1,0080
13x13	0,8900	0,9580	0,9870	1,0030	1,0060	1,0090	1,0080	1,0070
14x14	0,8890	0,9570	0,9870	1,0030	1,0060	1,0080	1,0080	1,0070
15x15	0,8884	0,9560	0,9857	1,0018	1,0048	1,0072	1,0067	1,0060

Tamaño de Campo (cm²)	10x10	11x11	12x12	13x13	14x14	15x15
2x2	0,8927	0,8920	0,8906	0,8900	0,8890	0,8884
3x3	0,9606	0,9590	0,9583	0,9580	0,9570	0,9560
4x4	0,9905	0,9890	0,9881	0,9870	0,9870	0,9857
5x5	1,0066	1,0050	1,0042	1,0030	1,0030	1,0018
6x6	1,0096	1,0080	1,0072	1,0060	1,0060	1,0048
7x7	1,0120	1,0110	1,0096	1,0090	1,0080	1,0072
8x8	1,0115	1,0100	1,0091	1,0080	1,0080	1,0067
9x9	1,0110	1,0090	1,0080	1,0070	1,0070	1,0060
10x10	1,0096	1,0080	1,0072	1,0060	1,0060	1,0048
11x11	1,0080	1,0070	1,0060	1,0050	1,0040	1,0040
12x12	1,0060	1,0060	1,0048	1,0040	1,0030	1,0024
13x13	1,0060	1,0050	1,0040	1,0030	1,0020	1,0020
14x14	1,0060	1,0040	1,0030	1,0020	1,0020	1,0010
15x15	1,0048	1,0040	1,0024	1,0020	1,0010	1,0000

Tabla 5. 9. Factores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 9 MeV usando un aplicador de 15x15 cm² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm² y el aplicador de 15x15 cm²

Para el cono de 20x20 cm²

Tamaño de Campo (cm ²)	2x2	3x3	4x4	5x5	6x6	7x7	8x8	9x9	10x10	
2x2	0,7706	0,8226	0,8593	0,8698	0,8736	0,8762	0,8757	0,8750	0,8736	
3x3	0,8226	0,8781	0,9173	0,9285	0,9326	0,9353	0,9348	0,9340	0,9326	
4x4	0,8593	0,9173	0,9583	0,9700	0,9742	0,9771	0,9766	0,9750	0,9742	
5x5	0,8698	0,9285	0,9700	0,9818	0,9861	0,9890	0,9885	0,9870	0,9861	
6x6	0,8736	0,9326	0,9742	0,9861	0,9904	0,9933	0,9928	0,9920	0,9904	
7x7	0,8762	0,9353	0,9771	0,9890	0,9933	0,9963	0,9957	0,9950	0,9933	
8x8	0,8757	0,9348	0,9766	0,9885	0,9928	0,9957	0,9952	0,9940	0,9928	
9x9	0,8750	0,9340	0,9750	0,9870	0,9920	0,9950	0,9940	0,9930	0,9920	
10x10	0,8736	0,9326	0,9742	0,9861	0,9904	0,9933	0,9928	0,9920	0,9904	
11x11	0,8720	0,9310	0,9730	0,9850	0,9890	0,9920	0,9910	0,9900	0,9890	
12x12	0,8712	0,9300	0,9716	0,9834	0,9877	0,9906	0,9901	0,9890	0,9877	
13x13	0,8710	0,9300	0,9710	0,9830	0,9870	0,9900	0,9900	0,9890	0,9870	
14x14	0,8710	0,9300	0,9710	0,9830	0,9870	0,9900	0,9900	0,9880	0,9870	
15x15	0,8705	0,9293	0,9708	0,9826	0,9869	0,9898	0,9893	0,9880	0,9869	
16x16	0,8700	0,9290	0,9700	0,9820	0,9860	0,9890	0,9890	0,9880	0,9860	
17x17	0,8700	0,9280	0,9700	0,9820	0,9860	0,9890	0,9880	0,9870	0,9860	
18x18	0,8690	0,9280	0,9690	0,9810	0,9850	0,9880	0,9880	0,9860	0,9850	
19x19	0,8690	0,9270	0,9690	0,9800	0,9850	0,9880	0,9870	0,9860	0,9850	
20x20	0,8682	0,9268	0,9681	0,9799	0,9842	0,9872	0,9866	0,9850	0,9842	
Tamaño de Campo (cm ²)	11x11	12x12	13x13	14x14	15x15	16x16	17x17	18x18	19x19	20x20
2x2	0,8720	0,8712	0,8710	0,8710	0,8705	0,8700	0,8700	0,8690	0,8690	0,8682
3x3	0,9310	0,9300	0,9300	0,9300	0,9293	0,9290	0,9280	0,9280	0,9270	0,9268
4x4	0,9730	0,9716	0,9710	0,9710	0,9708	0,9700	0,9700	0,9690	0,9690	0,9681
5x5	0,9850	0,9834	0,9830	0,9830	0,9826	0,9820	0,9820	0,9810	0,9800	0,9799
6x6	0,9890	0,9877	0,9870	0,9870	0,9869	0,9860	0,9860	0,9850	0,9850	0,9842
7x7	0,9920	0,9906	0,9900	0,9900	0,9898	0,9890	0,9890	0,9880	0,9880	0,9872
8x8	0,9910	0,9901	0,9900	0,9900	0,9893	0,9890	0,9880	0,9880	0,9870	0,9866
9x9	0,9900	0,9890	0,9890	0,9880	0,9880	0,9880	0,9870	0,9860	0,9860	0,9850
10x10	0,9890	0,9877	0,9870	0,9870	0,9869	0,9860	0,9860	0,9850	0,9850	0,9842
11x11	0,9880	0,9860	0,9860	0,9860	0,9860	0,9850	0,9840	0,9840	0,9830	0,9830

12x12	0,9860	0,9850	0,9850	0,9840	0,9842	0,9840	0,9830	0,9830	0,9820	0,9815
13x13	0,9860	0,9850	0,9840	0,9840	0,9840	0,9830	0,9830	0,9820	0,9820	0,9810
14x14	0,9860	0,9840	0,9840	0,9840	0,9840	0,9830	0,9830	0,9820	0,9820	0,9810
15x15	0,9860	0,9842	0,9840	0,9840	0,9834	0,9830	0,9820	0,9820	0,9810	0,9807
16x16	0,9850	0,9840	0,9830	0,9830	0,9830	0,9820	0,9820	0,9810	0,9810	0,9800
17x17	0,9840	0,9830	0,9830	0,9830	0,9820	0,9820	0,9810	0,9810	0,9800	0,9800
18x18	0,9840	0,9830	0,9820	0,9820	0,9820	0,9810	0,9810	0,9800	0,9800	0,9790
19x19	0,9830	0,9820	0,9820	0,9820	0,9810	0,9810	0,9800	0,9800	0,9790	0,9790
20x20	0,9830	0,9815	0,9810	0,9810	0,9807	0,9800	0,9800	0,9790	0,9790	0,9781

Tabla 5. 10. Factores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 9 MeV usando un aplicador de 20x20 cm² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm² y el aplicador de 15x15 cm²

Para el cono de 25x25 cm²

Tamaño de Campo (cm²)	2x2	3x3	4x4	5x5	6x6	7x7	8x8	9x9
2x2	0,7684	0,8276	0,8492	0,8595	0,8624	0,8638	0,8631	0,8630
3x3	0,8276	0,8914	0,9146	0,9258	0,9289	0,9304	0,9296	0,9290
4x4	0,8492	0,9146	0,9385	0,9499	0,9531	0,9547	0,9539	0,9540
5x5	0,8595	0,9258	0,9499	0,9615	0,9647	0,9663	0,9655	0,9650
6x6	0,8624	0,9289	0,9531	0,9647	0,9679	0,9695	0,9687	0,9690
7x7	0,8638	0,9304	0,9547	0,9663	0,9695	0,9711	0,9703	0,9790
8x8	0,8631	0,9296	0,9539	0,9655	0,9687	0,9703	0,9695	0,9690
9x9	0,8630	0,9290	0,9540	0,9650	0,9690	0,9700	0,9690	0,9690
10x10	0,8629	0,9294	0,9536	0,9652	0,9684	0,9700	0,9692	0,9690
11x11	0,8620	0,9290	0,9530	0,9650	0,9680	0,9690	0,9690	0,9680
12x12	0,8617	0,9281	0,9523	0,9639	0,9671	0,9687	0,9679	0,9680
13x13	0,8610	0,9270	0,9510	0,9630	0,9660	0,9680	0,9670	0,9670
14x14	0,8600	0,9260	0,9510	0,9620	0,9650	0,9670	0,9660	0,9660
15x15	0,8593	0,9255	0,9497	0,9612	0,9644	0,9660	0,9652	0,9650
16x16	0,8590	0,9250	0,9490	0,9610	0,9640	0,9650	0,9650	0,9650
17x17	0,8580	0,9240	0,9490	0,9600	0,9630	0,9650	0,9640	0,9640
18x18	0,8570	0,9240	0,9480	0,9590	0,9630	0,9640	0,9630	0,9630
19x19	0,8570	0,9230	0,9470	0,9590	0,9620	0,9640	0,9630	0,9630
20x20	0,8567	0,9227	0,9468	0,9583	0,9615	0,9631	0,9623	0,9620
21x21	0,8570	0,9230	0,9470	0,9580	0,9610	0,9630	0,9620	0,9620
22x22	0,8560	0,9230	0,9470	0,9580	0,9610	0,9630	0,9620	0,9620
23x23	0,8560	0,9220	0,9460	0,9580	0,9610	0,9630	0,9620	0,9620
24x24	0,8560	0,9220	0,9460	0,9580	0,9610	0,9620	0,9620	0,9620
25x25	0,8562	0,9222	0,9462	0,9577	0,9609	0,9625	0,9617	0,9620

Tamaño de Campo (cm²)	10x10	11x11	12x12	13x13	14x14	15x15	16x16	17x17
2x2	0,8629	0,8620	0,8617	0,8610	0,8600	0,8593	0,8590	0,8580
3x3	0,9294	0,9290	0,9281	0,9270	0,9260	0,9255	0,9250	0,9240
4x4	0,9536	0,9530	0,9523	0,9510	0,9510	0,9497	0,9490	0,9490
5x5	0,9652	0,9650	0,9639	0,9630	0,9620	0,9612	0,9610	0,9600
6x6	0,9684	0,9680	0,9671	0,9660	0,9650	0,9644	0,9640	0,9630
7x7	0,9700	0,9690	0,9687	0,9680	0,9670	0,9660	0,9650	0,9650
8x8	0,9692	0,9690	0,9679	0,9670	0,9660	0,9652	0,9650	0,9640
9x9	0,9690	0,9680	0,9680	0,9670	0,9660	0,9650	0,9650	0,9640
10x10	0,9690	0,9680	0,9676	0,9670	0,9660	0,9650	0,9640	0,9640
11x11	0,9680	0,9680	0,9670	0,9660	0,9650	0,9640	0,9640	0,9630
12x12	0,9676	0,9670	0,9663	0,9650	0,9650	0,9636	0,9630	0,9620
13x13	0,9670	0,9660	0,9650	0,9650	0,9640	0,9630	0,9620	0,9620
14x14	0,9660	0,9650	0,9650	0,9640	0,9630	0,9620	0,9610	0,9610
15x15	0,9650	0,9640	0,9636	0,9630	0,9620	0,9610	0,9600	0,9600
16x16	0,9640	0,9640	0,9630	0,9620	0,9610	0,9600	0,9600	0,9590
17x17	0,9640	0,9630	0,9620	0,9620	0,9610	0,9600	0,9590	0,9590
18x18	0,9630	0,9630	0,9620	0,9610	0,9600	0,9590	0,9590	0,9580
19x19	0,9630	0,9620	0,9610	0,9600	0,9590	0,9590	0,9580	0,9570
20x20	0,9620	0,9610	0,9607	0,9600	0,9590	0,9580	0,9570	0,9570
21x21	0,9620	0,9610	0,9610	0,9600	0,9590	0,9580	0,9570	0,9570
22x22	0,9620	0,9610	0,9600	0,9600	0,9590	0,9580	0,9570	0,9570
23x23	0,9620	0,9610	0,9600	0,9590	0,9590	0,9580	0,9570	0,9570
24x24	0,9620	0,9610	0,9600	0,9590	0,9580	0,9580	0,9570	0,9560
25X25	0,9615	0,9610	0,9601	0,9590	0,9580	0,9575	0,9570	0,9560
Tamaño de Campo (cm²)	18x18	19x19	20x20	21x21	22x22	23x23	24x24	25X25
2x2	0,8580	0,8570	0,8567	0,8570	0,8560	0,8560	0,8560	0,8562
3x3	0,9240	0,9230	0,9227	0,9230	0,9230	0,9220	0,9220	0,9222
4x4	0,9480	0,9470	0,9468	0,9470	0,9470	0,9460	0,9460	0,9462
5x5	0,9590	0,9590	0,9583	0,9580	0,9580	0,9580	0,9580	0,9577
6x6	0,9630	0,9620	0,9615	0,9610	0,9610	0,9610	0,9610	0,9609
7x7	0,9640	0,9640	0,9631	0,9630	0,9630	0,9630	0,9630	0,9625
8x8	0,9630	0,9630	0,9623	0,9620	0,9620	0,9620	0,9620	0,9617
9x9	0,9630	0,9630	0,9620	0,9620	0,9620	0,9620	0,9620	0,9620
10x10	0,9630	0,9630	0,9620	0,9620	0,9620	0,9620	0,9620	0,9615

11x11	0,9630	0,9620	0,9610	0,9610	0,9610	0,9610	0,9610	0,9610
12x12	0,9620	0,9610	0,9607	0,9610	0,9600	0,9600	0,9600	0,9601
13x13	0,9610	0,9600	0,9600	0,9600	0,9600	0,9590	0,9590	0,9590
14x14	0,9600	0,9590	0,9590	0,9590	0,9590	0,9590	0,9580	0,9580
15x15	0,9590	0,9590	0,9580	0,9580	0,9580	0,9580	0,9580	0,9575
16x16	0,9590	0,9580	0,9570	0,9570	0,9570	0,9570	0,9570	0,9570
17x17	0,9580	0,9570	0,9570	0,9570	0,9570	0,9570	0,9560	0,9560
18x18	0,9570	0,9570	0,9560	0,9560	0,9560	0,9560	0,9560	0,9560
19x19	0,9570	0,9560	0,9560	0,9560	0,9550	0,9550	0,9550	0,9550
20x20	0,9560	0,9560	0,9551	0,9550	0,9550	0,9550	0,9550	0,9545
21x21	0,9560	0,9560	0,9550	0,9550	0,9550	0,9550	0,9550	0,9540
22x22	0,9560	0,9550	0,9550	0,9550	0,9550	0,9550	0,9540	0,9540
23x23	0,9560	0,9550	0,9550	0,9550	0,9550	0,9540	0,9540	0,9540
24x24	0,9560	0,9550	0,9550	0,9550	0,9540	0,9540	0,9540	0,9540
25x25	0,9560	0,9550	0,9545	0,9540	0,9540	0,9540	0,9540	0,9540

Tabla 5. 11. Factores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 9 MeV usando un aplicador de 25x25 cm² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm² y el aplicador de 15x15 cm²

5.4 FACTORES DE SALIDA PARA ELECTRONES DE 4, 6, 12, 15 Y 18 MeV

A continuación se presentan los valores medidos de factores de salida para las energías de 4, 6, 12, 15, y 18 MeV sin aplicar ninguna normalización.

Para un haz de electrones de 4 MeV se obtuvo:

Tamaño de Campo (cm²)	Aplicador (cm²)				
	6x6	10x10	15x15	20x20	25x25
2x2	0,8166	0,8732	0,8765	0,8526	0,9211
3x3	0,8896	0,9918	0,9733	0,9799	1,0359
4x4	0,8999	1,0169	0,9935	1,0207	1,0626
5x5	0,9015	1,0245	1,0114	1,0326	1,0773
6x6	0,8983	1,0245	1,0033	1,0332	1,0778
7x7		1,0174	1,0065	1,0370	1,0794
8x8		1,0185	1,0044	1,0343	1,0794
10x10		1,0152	1,0044	1,0321	1,0789

12x12	0,9995	1,0299	1,0767
15x15	1,0000	1,0348	1,0745
20x20		1,0277	1,0718
25x25			1,0620

Tabla 5. 12. Factores de salida medidos para un haz de electrones de 4 MeV y normalizados respecto al valor obtenido usando el aplicador de 15x15 cm² abierto.

Para un haz de electrones de 6 MeV se obtuvo:

Tamaño de Campo (cm²)	Aplicador (cm²)				
	6x6	10x10	15x15	20x20	25x25
2x2	0,8303	0,8434	0,8234	0,8108	0,8623
3x3	0,9390	0,9606	0,9564	0,9390	0,9664
4x4	0,9695	0,9984	0,9947	0,9974	1,0005
5x5	0,9795	1,0116	1,0147	1,0095	1,0142
6x6	0,9695	1,0110	1,0089	1,0100	1,0147
7x7		1,0042	1,0110	1,0163	1,0168
8x8		1,0032	1,0089	1,0147	1,0152
10x10		1,0005	1,0068	1,0110	1,0147
12x12			1,0026	1,0084	1,0121
15x15			1,0000	1,0068	1,0089
20x20				1,0032	1,0053
25x25					1,0026

Tabla 5. 13. Factores de salida medidos para un haz de electrones de 6 MeV y normalizados respecto al valor obtenido usando el aplicador de 15x15 cm² abierto.

Para un haz de electrones de 12 MeV se obtuvo:

Tamaño de Campo (cm²)	Aplicador (cm²)				
	6x6	10x10	15x15	20x20	25x25
2x2	0,7555	0,7589	0,7234	0,7012	0,7655
3x3	0,9008	0,9074	0,8919	0,8514	0,8875
4x4	0,9656	0,9828	0,9656	0,9407	0,9424
5x5	1,0000	1,0216	0,9967	0,9773	0,9723
6x6	1,0216	1,0305	1,0105	0,9945	0,9795

7x7	1,0266	1,0244	1,0067	0,9856
8x8	1,0283	1,0272	1,0067	0,9861
10x10	1,0277	1,0155	1,0022	0,9856
12x12		1,0155	0,9978	0,9806
15x15		1,0000	0,9922	0,9751
20x20			0,9850	0,9684
25x25				0,9662

Tabla 5. 14. Factores de salida medidos para un haz de electrones de 12 MeV y normalizados respecto al valor obtenido usando el aplicador de 15x15 cm² abierto.

Para un haz de electrones de 15 MeV se obtuvo:

Tamaño de Campo (cm ²)	Aplicador (cm ²)				
	6x6	10x10	15x15	20x20	25x25
2x2	0,7154	0,6720	0,6798	0,6687	0,7276
3x3	0,8755	0,8505	0,8644	0,8249	0,8655
4x4	0,9516	0,9605	0,9455	0,9266	0,9305
5x5	0,9872	1,0106	0,9933	0,9666	0,9616
6x6	1,0222	1,0233	1,0056	0,9844	0,9661
7x7		1,0245	1,0167	0,9989	0,9789
8x8		1,0278	1,0211	0,9978	0,9794
10x10		1,0272	1,0183	0,9944	0,9767
12x12			1,0067	0,9928	0,9739
15x15			1,0000	0,9872	0,9689
20x20				0,9767	0,9594
25x25					0,9555

Tabla 5. 15. Factores de salida medidos para un haz de electrones de 15 MeV y normalizados respecto al valor obtenido usando el aplicador de 15x15 cm² abierto.

Para un haz de electrones de 18 MeV se obtuvo:

Tamaño de Campo (cm²)	Aplicador (cm²)				
	6x6	10x10	15x15	20x20	25x25
2x2	0,7251	0,7193	0,6833	0,6734	0,7013
3x3	0,9002	0,8933	0,8840	0,8486	0,8614
4x4	0,9826	0,9774	0,9443	0,9536	0,9455
5x5	1,0029	1,0360	0,9890	0,9780	0,9809
6x6	1,0632	1,0360	1,0226	1,0099	0,9751
7x7		1,0487	1,0081	1,0145	0,9855
8x8		1,0505	1,0394	1,0238	1,0006
10x10		1,0522	1,0336	1,0209	0,9954
12x12			1,0296	1,0064	0,9988
15x15			1,0000	1,0081	0,9919
20x20				0,9780	0,9814
25x25					0,9698

Tabla 5. 16. Factores de salida medidos para un haz de electrones de 18 MeV y normalizados respecto al valor obtenido usando el aplicador de 15x15 cm² abierto.

En el Apéndice A se encuentran las tablas de los factores de salida medidos para todas estas energías, normalizados respecto al valor obtenido utilizando un aplicador de 15x15 cm² abierto y con los valores obtenidos utilizando la ecuación de Mills además de los obtenidos mediante la interpolación realizada por el sistema de planificación de tratamiento.

5.5 DISTANCIA FUENTE SUPERFICIE EFECTIVA (SSD_{EFF})

Para energía de 9 MeV

A continuación se presentan los resultados de las lecturas de carga obtenidas a una SSD de 100, 110 y 120cm (mas la d_{max} correspondiente a una energía de 9 MeV) para todos los conos.

d_{max}= 1,96 cm

Cono (cm ²)	SSD		
	101,96 (cm)	111,96 (cm)	121,96 (cm)
6	18	14,27	11,09
10	18,8	15,15	12,38
15	18,63	15,19	12,46
20	18,35	15,02	12,35
25	17,95	14,69	12,1

Tabla 5. 17. Valores de carga medidos para todos los tamaños de cono y a diferentes SSD (100, 110 y 120 cm mas dmax) utilizando un haz de electrones de 9 MeV

Para el cono 6x6 cm² se tiene:

I _o (101,96 cm)	I _g (111,96 cm)	I _g (121,96 cm)
18	14,27	11,09

Luego de graficar se obtuvo

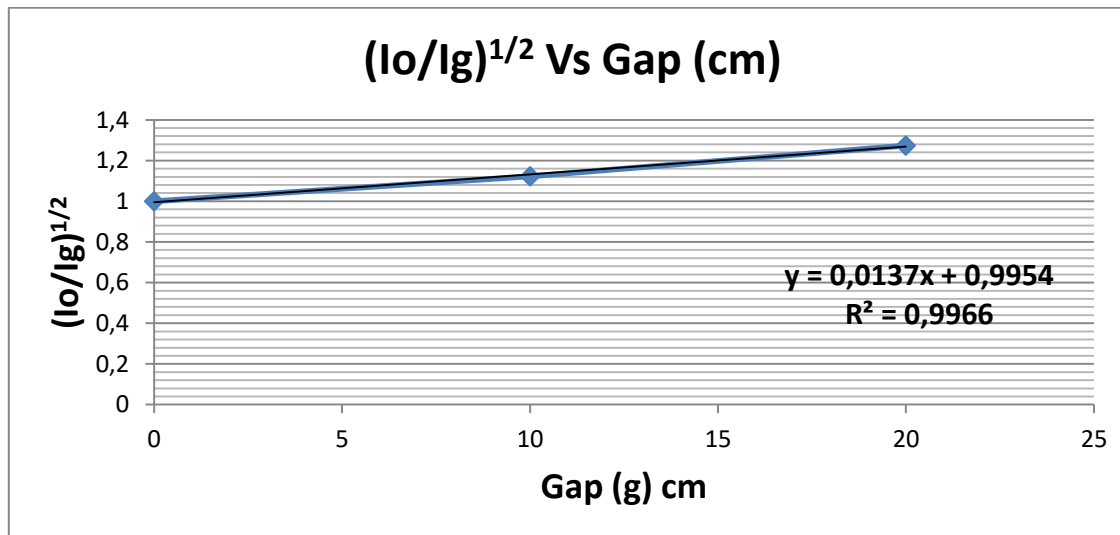


Figura 5. 1. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 9 MeV y un aplicador de 6x6 cm².

La SSD_{eff} calculada para la energía de 9 MeV y el cono 6x6 cm² fue de **73,0**

Para el cono de 10x10 cm² los resultados fueron los siguientes:

I_o (100,60 cm)	I_g (111,96 cm)	I_g (121,96 cm)
18,8	15,15	12,38

Luego de graficar se obtuvo:

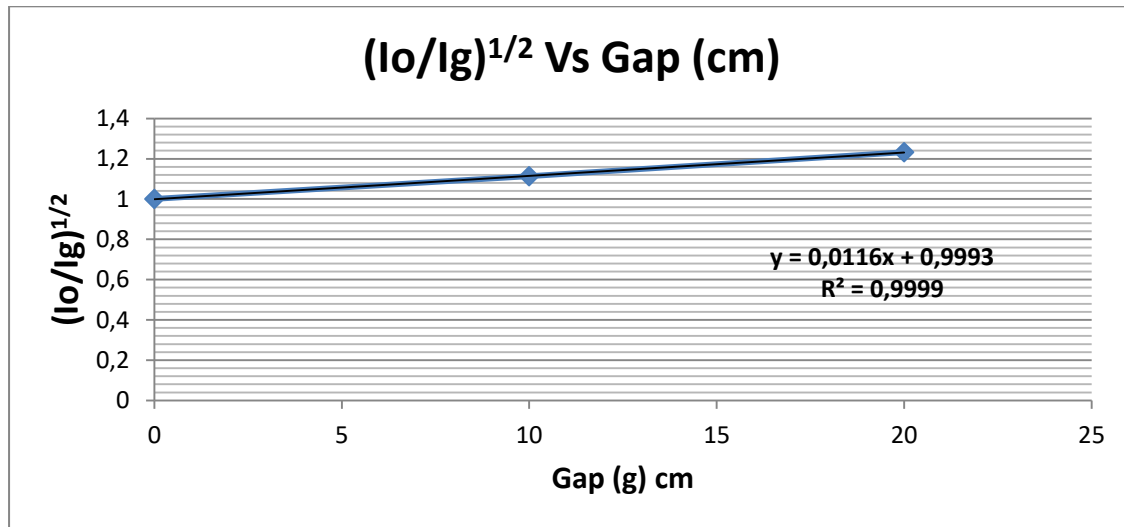


Figura 5. 2. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 9 MeV y un aplicador de 10x10 cm².

La SSD_{eff} calculada para la energía de 9 MeV y el cono 10x10 cm² fue de **86,2**

Para el cono de 15x15 cm² los resultados fueron los siguientes:

I_o (101,96 cm)	I_g (111,96 cm)	I_g (121,96 cm)
18,63	15,19	12,46

Luego de graficar se obtuvo:

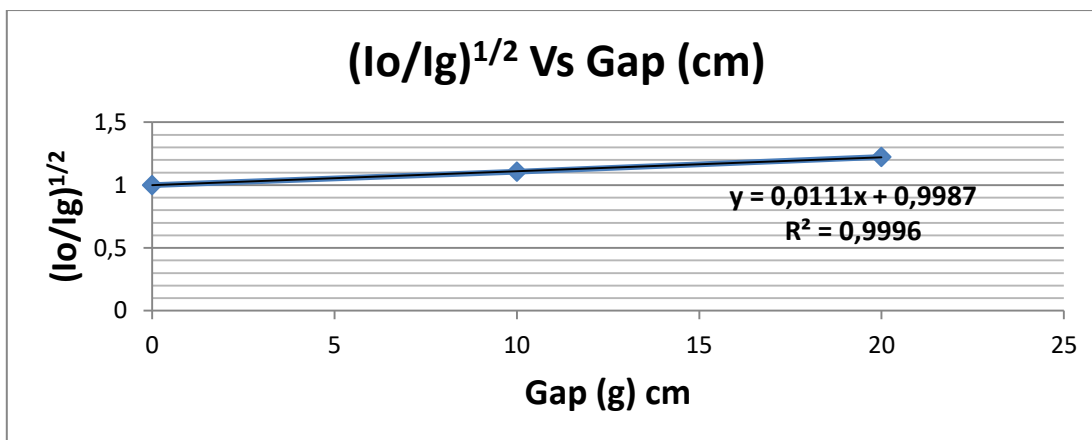


Figura 5. 3. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 9 MeV y un aplicador de 15x15 cm².

La SSD_{eff} calculada para la energía de 9 MeV y el cono 15x15 cm² fue de **90,1**

Para el cono de 20x20 cm² los resultados fueron los siguientes:

I_o (101,96 cm)	I_g (111,96 cm)	I_g (121,96 cm)
18,35	15,02	12,35

Luego de graficar se obtuvo:

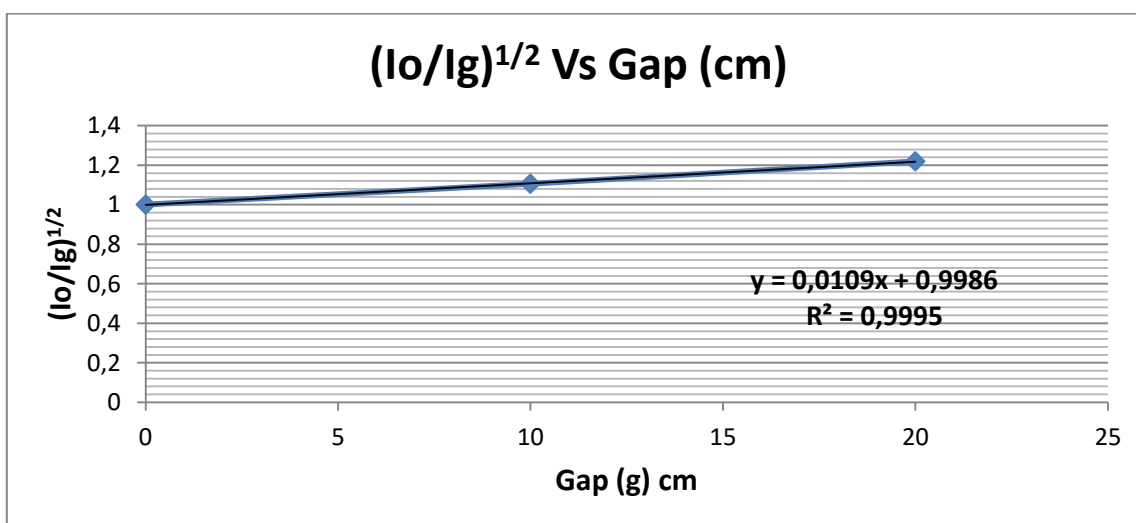


Figura 5. 4. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 9 MeV y un aplicador de 20x20 cm².

La SSD_{eff} calculada para la energía de 9 MeV y el cono 20x20 cm² fue de **91,7**

Para el cono de 25x25 cm² los resultados fueron los siguientes:

I_o (101,96 cm)	I_g (111,96 cm)	I_g (121,96 cm)
17,95	14,69	12,1

Luego de graficar se obtuvo:

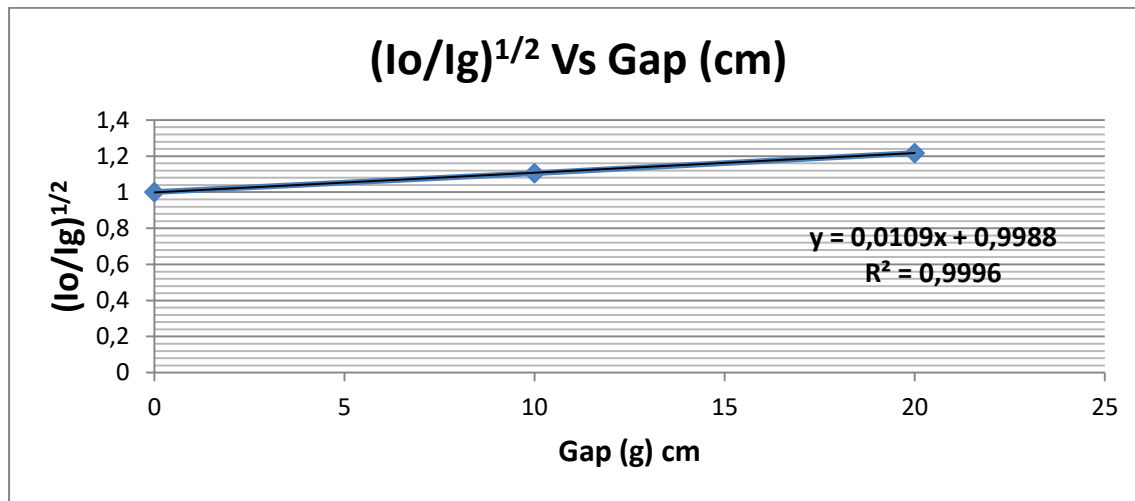


Figura 5. 5. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 9 MeV y un aplicador de 25x25 cm².

La SSD_{eff} calculada para la energía de 9 MeV y el cono 25x25 cm² fue de **91,7**

Los valores de las medidas realizadas para las otras energías disponibles del acelerador (4, 6, 12, 15, y 18 MeV) utilizando todos los conos, se encuentran en el Apéndice B del presente documento, así como las gráficas correspondientes para determinar la pendiente.

A continuación se muestran todos los resultados de SSD_{eff} obtenidos para todas las energías disponibles del acelerador y todos los conos.

Cono (cm ²)	Energías					
	4 MeV	6 MeV	9 MeV	12 MeV	15 MeV	18 MeV
6	44,4	64,5	73,0	80,6	83,3	87,7
10	64,1	82,6	86,2	88,5	91,7	92,6
15	71,9	87,7	90,1	90,1	96,2	95,2
20	80,6	90,9	91,7	94,3	96,2	98,0
25	81,3	91,7	91,7	94,3	94,3	89,3

Tabla 5. 18. Valores de distancia fuente superficie efectiva (SSDeff) calculados para todas las energías disponibles del acelerador lineal y para todos los conos

Al comparar los resultados anteriores con los resultados publicados por el grupo de trabajo número 71 de la AAPM en su reporte 258 (para las energías de 6, 9 y 12 MeV) se obtuvieron las siguientes diferencias porcentuales:

Cono (cm ²)	Energías		
	6 MeV	9 MeV	12 MeV
6	3,7	2,3	0,6
10	-0,3	-0,4	2,0
15	-3,3	0,9	1,8
20	1,0	0,1	3,2
25	1,2	0,2	3,7

Tabla 5. 19. Diferencia porcentual entre los valores de SSDeff calculados y los valores reportados por el grupo de trabajo 71 de la AAPM en su reporte número 258.

5.6 COMPARACIÓN DE DOSIS ENTRE SPT, CÁLCULO PUNTUAL Y DOSIMETRÍA

A continuación se muestran los resultados de dosis, obtenidos para los planes realizados con una energía de 9 MeV y utilizando los diferentes aplicadores con diferentes tamaños de inserto y la diferencia porcentual entre los resultados arrojados por el cálculo del sistema de planificación de tratamiento y el cálculo puntual contra los valores obtenidos de las mediciones.

Aplicador (cm²)	Inserto (cm²)	Dosis medida (cGy)	Dosis Calculada SPT (cGy)	Dosis Calculo Puntual (cGy)	Dif. % entre SPT y Medidas	Dif. % entre C. Puntual y Medidas
6	2x5	172,03	168,07	176,51	-2,3	2,6
	3x4	190,42	181,00	187,82	-4,9	-1,4
	4x4	195,58	186,92	193,40	-4,4	-1,1
	3x8	192,57	185,19	191,91	-3,8	-0,3
10	4x7	200,85	191,39	198,39	-4,7	-1,2
	4x5	200,31	190,48	198,78	-4,9	-0,8
	5x10	202,78	194,17	201,40	-4,2	-0,7
15	6x13	202,35	196,08	201,30	-3,1	-0,5
	7x10	203,43	196,08	202,40	-3,6	-0,5
	6x15	199,13	198,02	197,30	-0,6	-0,9
20	8x18	199,56	198,02	197,49	-0,8	-1,0
	9x14	198,91	199,00	197,70	0,0	-0,6
	8x16	195,15	199,00	193,00	2,0	-1,1
25	6x20	195,47	199,00	192,30	1,8	-1,6
	11x21	194,39	200,00	192,30	2,9	-1,1

Tabla 5. 20. Resultados de dosis medida usando el diodo semiconductor, dosis calculada por el sistema de planificación de tratamiento y dosis calculada puntualmente para planes usando diferentes aplicadores, diferentes insertos y un haz de electrones de 9 MeV.

La siguiente tabla muestra los resultados de dosis, obtenidos para los planes realizados con una energía de 9 MeV y el aplicador de 15x15 cm² utilizando diferentes tamaños de inserto y distancias fuente superficie (SSD) extendidas. Además se muestra la diferencia porcentual entre los resultados arrojados por el Sistema de Planificación de Tratamiento y el Cálculo puntual contra los valores obtenidos de las mediciones.

SSD (cm)	Inserto (cm²)	Dosis medida (cGy)	Dosis Calculada SPT (cGy)	Dosis Calculo Puntual (cGy)	Dif. % entre SPT y Medidas	Dif. % entre C. Puntual y Medidas
102	5x12	191,79	186,92	192,44	-2,5	0,3
	4x4	184,89	180,18	186,22	-2,5	0,7
	3x13	181,12	177,78	183,43	-1,8	1,3
	6x13	192,33	187,79	192,82	-2,4	0,3
	5x12	183,17	180,18	184,51	-1,6	0,7
	4x4	175,73	173,91	178,54	-1,0	1,6

104	3x13	171,74	170,94	175,87	-0,5	2,4
	6x13	184,03	181,00	184,87	-1,6	0,5

Tabla 5. 21. Resultados de dosis medida usando el diodo semiconductor, dosis calculada por el sistema de planificación de tratamiento y dosis calculada puntualmente para planes usando el aplicador de 15x15 cm², insertos de diferente tamaño, un haz de electrones de 9 MeV y con SSD extendidas.

A continuación se muestran los resultados de carga obtenidos para planes realizados con diferentes valores de energía, así como también diferentes aplicadores e insertos con un parámetro fijo de 200 MU. Se compararon los resultados medidos, los calculados por el SPT y los calculados puntualmente para obtener la diferencia porcentual entre la dosis resultante de los planes calculados y la dosis medida.

Energía (MeV)	Aplicador (cm²)	Inserto (cm²)	Dosis medida (cGy)	Dosis Calculada SPT (cGy)	Dosis Calculo Puntual (cGy)	Dif. % entre SPT y Medidas	Dif. % entre C. Puntual y Medidas
4	6	3x5	182,30	173,16	179,10	-5,0	-1,8
	10	3x8	197,48	184,76	200,98	-6,4	1,8
	15	3x13	198,88	191,39	197,28	-3,8	-0,8
	20	2x18	185,20	187,79	187,56	1,4	1,3
	25	3x23	199,99	187,98	210,18	-6,0	5,1
6	6	3x5	194,08	186,05	191,76	-4,1	-1,2
	10	3x8	198,22	211,15	196,36	6,5	-0,9
	15	3x13	196,82	189,57	195,75	-3,7	-0,5
	20	2x18	180,99	176,21	180,56	-2,6	-0,2
	25	3x23	193,25	191,89	200,10	-0,7	3,5
12	6	3x5	190,75	179,82	189,84	-5,7	-0,5
	10	3x8	191,30	183,13	193,12	-4,3	1,0
	15	3x13	189,97	185,19	189,83	-2,5	-0,1
	20	2x18	166,60	172,41	166,44	3,5	-0,1
	25	3x23	178,23	184,33	185,23	3,4	3,9

15	6	3x5	184,32	170,14	185,97	-7,7	0,9
	10	3x8	187,97	177,69	186,95	-5,5	-0,5
	15	3x13	186,86	178,57	186,27	-4,4	-0,3
	20	2x18	162,94	156,86	162,02	-3,7	-0,6
	25	3x23	175,96	177,78	181,97	1,0	3,4
18	6	3x5	186,06	186,92	190,02	0,5	2,1
	10	3x8	190,34	191,39	193,76	0,5	1,8
	15	3x13	187,56	198,02	189,91	5,6	1,3
	20	2x18	163,71	177,32	163,25	8,3	-0,3
	25	3x23	176,21	186,35	183,15	5,8	3,9

Tabla 5. 22. Resultados de dosis medida usando el diodo semiconductor, dosis calculada por el sistema de planificación de tratamiento y dosis calculada puntualmente para planes de tratamiento usando diferentes energías, diferentes aplicadores y diferentes insertos.

CAPÍTULO 6

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 DETERMINAR R_{50}

Luego de comparar los valores de R_{50} obtenidos en las mediciones actuales con los obtenidos durante las calibraciones realizadas al acelerador en el año 2012 se obtuvo que la mayor diferencia se presentó para la energía 18 MeV con 0,13 cm de diferencia, mientras que para el resto de las energías la diferencia se mantuvo en valores menores a 0,07 cm.

Al comparar los resultados de R_{50} obtenidos en las mediciones actuales con los valores medidos durante la calibración del acelerador en el año 2014, se obtuvo como mayor diferencia un 0,11 cm para la energía de 18MeV mientras que el resto de las energías mantuvo una diferencia menor a 0,06 cm.

La tolerancia para R_{50} publicada en el Manual de Aceptación de Varian [19] es de $\pm 0,1$ cm. En ambas comparaciones es apreciable que los resultados se encuentran dentro de un rango de tolerancia bastante aceptable, por ende, los valores calculados de la profundidad Z_{ref} , que se realizan a partir de R_{50} son valores confiables y se pueden utilizar para realizar las mediciones de los factores de salida.

6.2 ELECCIÓN DEL DETECTOR

Al usar la cámara de ionización plano paralela para medir el factor de salida para el campo más pequeño comparable ($2 \times 2 \text{ cm}^2$) con respecto al publicado por la AAPM se obtuvo una diferencia porcentual de 18%, mientras que al utilizar el diodo para realizar la misma medición se obtuvo un porcentaje de error de 6%.

La cámara de ionización es conocida como uno de los detectores más precisos, sin embargo el volumen de la cámara resulta ser relativamente grande al momento de medir campos

pequeños, ya que la cámara tiene un radio que llega a los 7,7 mm y el campo de menor tamaño a evaluar es de $2 \times 2 \text{ cm}^2$. Al ser el tamaño de la cámara muy cercano al tamaño de campo a evaluar, obviamente la respuesta del detector no es satisfactoria.

Como consecuencia de lo anterior, se determinó que el detector que se utilizaría para realizar las medidas de dosimetría absoluta (factores de salida y dosis en Z_{ref}) en el presente trabajo sería el diodo semiconductor, mientras que la cámara plano-paralela se utilizaría para medidas relativas (Porcentajes de Dosis en profundidad)

6.3 FACTORES DE SALIDA

La AAPM en su reporte número 258 publicó valores de salida para un haz de electrones de 9 MeV para algunos campos cuadrados y los normalizó al valor obtenido para el campo de $10 \times 10 \text{ cm}^2$. En el presente trabajo se midieron los factores de salida en la misma configuración descrita anteriormente y la comparación arrojó una diferencia porcentual promedio de 0,2% con una desviación estándar igual a 2,4. Se obtuvo un máximo de hasta 3% de diferencia para los tamaños de campos desde $3 \times 3 \text{ cm}^2$ hasta $25 \times 25 \text{ cm}^2$, mientras que para los tamaños de campo más pequeños ($2 \times 2 \text{ cm}^2$) la mayor diferencia porcentual que se obtuvo fue de 7%.

Los resultados para los campos que van desde 3×3 hasta $25 \times 25 \text{ cm}^2$ se encuentran en valores de tolerancia aceptables mientras que los valores para los campos de $2 \times 2 \text{ cm}^2$ están fuera de tolerancia.

La razón más probable por la cual se obtuvo un 7% de diferencia para los factores de salida en tamaños de campo de $2 \times 2 \text{ cm}^2$ respecto a los resultados publicados por la AAPM puede deberse a la modificación de dosis que se presenta en la dosimetría de campos pequeños para haces de electrones, que es causada por la ausencia de equilibrio electrónico lateral dentro del maniquí y la relación entre el tamaño del detector y el tamaño del campo.

La salida en el eje central es dependientes del tamaño de campo, debido al aumento de la dispersión desde el colimador y en el maniquí.

El efecto del tamaño de campo sobre la salida y la distribución de dosis en profundidad en el eje central es significativa mientras la distancia entre el punto de medición y el eje del

campo sea más pequeña que el rango de dispersión electrónica lateral. Luego de alcanzar esta distancia no hay más incremento de la dosis en profundidad debido a la dispersión causada por el maniquí. Cuando el tamaño de campo se reduce por debajo del valor requerido para tener un equilibrio de dispersión lateral, la dosis decae rápidamente (Véase Figura 6.1). [4]

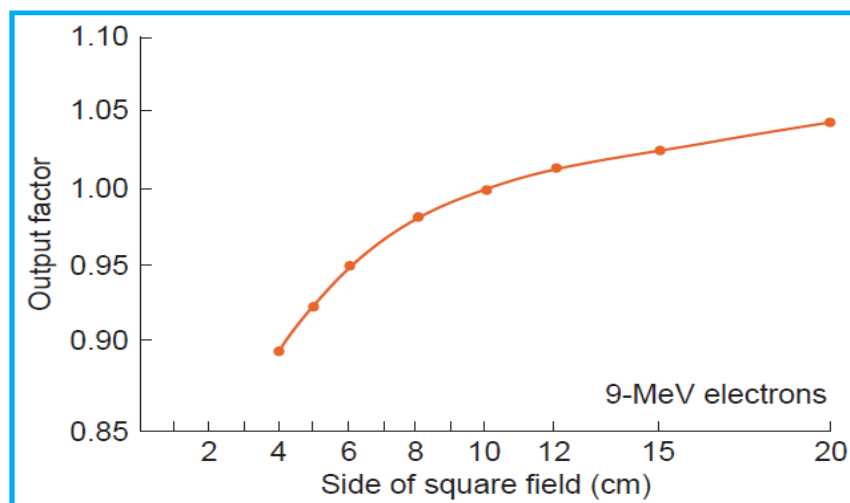


Figura 6. 1. Factores de salida en función del tamaño de campo.

Además de todo lo explicado anteriormente, también cabe destacar la existencia de un pequeño margen de error a la hora de la elaboración de los insertos que puede acentuarse en el caso de los campos más pequeños ya que es un trabajo manual que no garantiza un cuadrado de $2 \times 2 \text{ cm}^2$ perfecto en los bordes o en el centrado, por lo que podría influir en la diferencia porcentual obtenida en la comparación de los valores medidos y los valores publicados por la AAPM.

El objetivo de la comparación fue validar las mediciones de factores de salida para un haz de electrones de 9 MeV para luego realizar las mediciones correspondientes al resto de las energías disponibles del acelerador. Basados en los resultados, se estableció que las medidas fueron validadas satisfactoriamente dado que se mantuvieron dentro de una tolerancia aceptable.

Respecto a la medición de factores de salida para el resto de las energías del acelerador, se puede notar una coherencia en los resultados con base en los obtenidos para la energía de 9 MeV, donde los valores se acercan a 1 e incluso superan ese valor a medida que el campo se

hace más grande y van disminuyendo a medida que disminuye el tamaño de campo y disminuyen de manera más fuerte para el tamaño de campo más pequeño.

6.4 SSD EFECTIVA

Al comparar los resultados medidos de SSD_{eff} con los resultados publicados por la AAPM en su reporte número 258, la diferencia porcentual promedio que se obtuvo fue de 1,1% con una desviación estándar igual a 1,6. El mayor valor de diferencia porcentual que se obtuvo fue de 4%. Los resultados se encuentran dentro de un rango de tolerancia aceptable.

Al graficar la raíz del cociente entre las lecturas del detector a una distancia fuente superficie estándar y una extendida, es apreciable que la pendiente es muy sensible a variaciones del orden de los decimales en la lectura del detector y a su vez esa lectura es bastante sensible a la profundidad de medida utilizada para cada energía (d_{max}).

El posicionamiento correcto para medir con el diodo semiconductor es colocarlo justo debajo de la superficie del agua dentro del maniquí, sin embargo, aun cuando a la vista puede parecer que está justo en la posición correcta, podría tener hasta 0,3 mm de diferencia con el punto exacto de medida, lo cual podría explicar pequeñas variaciones en la lectura del detector que serían suficientes para modificar la pendiente calculada y por ende el parámetro de SSD_{eff} .

6.5 COMPARACIÓN DE DOSIS ENTRE SPT, CÁLCULO PUNTUAL Y DOSIMETRÍA

En el caso de los planes realizados con una energía de 9 MeV y diferentes tamaños de aplicadores e insertos, la diferencia porcentual entre la dosis calculada por el sistema de planificación de tratamiento y la dosis medida tuvo un promedio de 2% alcanzando hasta un máximo de 5% con un valor de desviación estándar igual a 2,7, mientras que para el caso de la comparación entre la dosis calculada puntualmente y la dosis medida se obtuvo una diferencia porcentual promedio de 0,7% alcanzando hasta un máximo de diferencia de 3% con un valor de desviación estándar igual a 1. Estos resultados se encuentran dentro de tolerancia y muestran coherencia entre la dosis que se desea entregar y la dosis que realmente entrega el acelerador.

Para el caso de los planes realizados con distancias fuente superficie extendidas, el análisis muestra que la diferencia porcentual promedio registrada entre la dosis calculada por el sistema de planificación de tratamiento y la dosis medida fue de 1,8% alcanzando hasta un máximo de 3% con un valor de desviación estándar igual a 0,4, mientras que la diferencia porcentual promedio registrada entre la dosis calculada puntualmente y la dosis medida fue de 1% alcanzando hasta un máximo de 2% con un valor de desviación estándar de 0,7. Ambos valores de diferencia se encuentran ampliamente dentro de la tolerancia de 5%.

En el caso de la evaluación de planes con SSD extendida, el sistema de planificación de tratamiento presenta una limitante en cuanto a la distancia extendida que permite introducir para realizar el cálculo de dosis con electrones. Solo permite utilizar una SSD extendida máxima de 104 cm, por lo que solo se realizaron planes con configuraciones de SSD extendida a 102 y 104 cm.

En la comparación de dosis realizada para los planes utilizando diferentes energías, diferentes aplicadores e insertos, se obtuvo una diferencia porcentual promedio entre la dosis calculada por el sistema de planificación de tratamiento y la dosis medida de 1,2% alcanzando un máximo de hasta 8% con una desviación estándar de 4,6. Este valor se encuentra fuera del valor de tolerancia de 5%.

La diferencia porcentual promedio entre la dosis calculada puntualmente y la dosis medida fue de 1% alcanzando un máximo de 5% con un valor de desviación estándar igual a 1,9. El máximo valor de diferencia obtenido en este caso está en el límite de la tolerancia.

Al igual que en el caso de los factores de salida, la distribución de dosis en profundidad también es dependiente del tamaño de campo y como se explicó anteriormente, la dependencia se vuelve más significativa mientras la distancia entre el punto de medida y el eje del campo sea más pequeña que el rango de dispersión electrónica lateral. Para campos pequeños, el factor de salida como la dosis en profundidad pueden reducirse significativamente comparadas con las distribuciones para campos grandes.

Además la profundidad $d_{\max}$ varía hacia la superficie para los campos pequeños. (Véase Figura 6.2). [4]

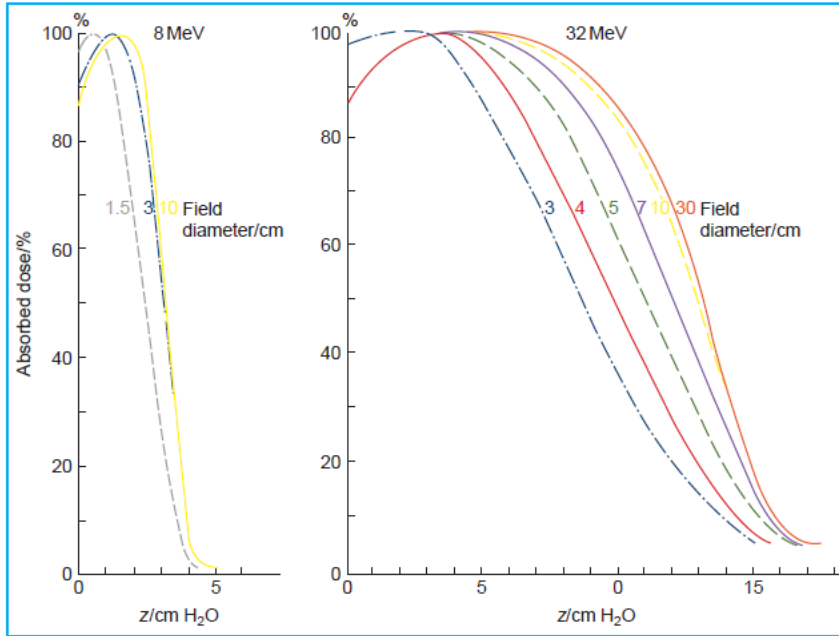


Figura 6. 2. Variación de distribución de dosis en profundidad con el tamaño de campo.

Khan [4], presenta una expresión para determinar el radio mínimo necesario para generar un equilibrio de dispersión lateral para todas las profundidades en el eje central de haz. La ecuación se muestra a continuación:

$$R_{eq} = 0,88 \sqrt{E_p} \quad (23)$$

Donde R_{eq} es el radio mínimo para tener un equilibrio de dispersión lateral (en centímetros) y E_p es la energía de mayor probabilidad en la superficie (en MeV).

En la práctica clínica, la expresión anterior se utiliza para clasificar los campos con radio menores a R_{eq} como campos pequeños y radios mayores a R_{eq} como campos grandes. A continuación se muestra una tabla con los valores de R_{eq} calculados para cada una de las energías disponibles del acelerador lineal del HCC.

Energía (MeV)	Radio equivalente (R_{eq}) (cm)
4	1,8
6	2,2
9	2,6

12	3
15	3,4
18	3,7

Tabla 6. 1. Valores de R_{eq} correspondientes a cada energía disponible del acelerador lineal Trilogy

La variación de la salida y la distribución de dosis en profundidad son motivos por los que la dosimetría de campos pequeños en haces de electrones se ha considerado un reto. [20][21][22]

El algoritmo GGPB necesita los datos de los PDD para cada energía disponible de electrones utilizando todos los aplicadores disponibles. Sin embargo, el algoritmo de cálculo solo pide datos referentes a campos abiertos, por lo que se puede asumir que al no tener los correspondientes de los PDD específicos para cada campo pequeño, el algoritmo no está tomando en cuenta la variación que se explica anteriormente, por consecuencia no aplicaría en el cálculo la dependencia del porcentaje de dosis en profundidad con el tamaño de campo y esa podría ser la razón por la cual la diferencia porcentual entre la dosis medida y la dosis planificada excede el valor de tolerancia.

Además de lo anterior, al igual que en el caso de medición de los factores de salida, y para la determinar la SSD efectiva, se utilizó el diodo semiconductor para medir la dosis en los diferentes planes de tratamiento que se evaluaron, por ende, también es relevante en este caso la existencia de diferencias submilimétricas en el correcto posicionamiento del diodo al momento de registrar las lecturas, ya que, no estar exactamente en la profundidad de referencia, podría resultar en diferencias de dosis que excedan la tolerancia, porque la medida estaría arrastrando el error de posicionamiento de forma implícita.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se llevó a cabo la comparación de dosis calculada por el sistema de planificación de tratamiento alimentado con la data medida en el presente trabajo, la dosis calculada puntualmente y la dosis medida para diferentes configuraciones de planes de tratamiento y la mayoría de valores obtenidos se encuentran dentro de un margen de tolerancia aceptable. En el caso de la comparación entre la dosis planificada y la dosis medida hay valores que salen de tolerancia por razones asumidas a limitaciones intrínsecas del sistema de planificación de tratamiento, sin embargo, los resultados generales permiten concluir que los datos medidos representan confiabilidad y validez suficientes para introducirse a un sistema de planificación de tratamiento y llevar a cabo cálculos de dosis para pacientes.

El sistema de planificación de tratamiento es un componente esencial en la radioterapia externa ya que se utiliza para planificar los arreglos del haz, la energía, tamaños de campo, patrones de fluencia y arreglo de modificadores para proveer una distribución de dosis optima mientras minimiza la dosis que llega a los órganos sanos. Sin embargo, es importante conocer las limitaciones de estos para no incurrir en errores al momento de calcular la dosis.

La exactitud del cálculo de dosis es primordial para lograr un tratamiento seguro y eficaz. Partiendo de lo anterior, es fundamental tomar datos de los factores de salida para haces de electrones de todas las energías de tratamiento con las que cuente el equipo y de todos los tamaños de campo posibles utilizables e introducir esos datos al sistema de planificación de tratamiento para que el algoritmo de cálculo pueda generar valores de unidades monitor resultantes que representen la dosis de prescripción con mayor exactitud.

La comparación realizada entre los valores de factores de salida para un haz de 9 MeV publicados por la AAPM y los medidos en el presente trabajo arrojó resultados satisfactorios, dentro de tolerancia, lo cual valida la metodología para medir los otros factores de salida para el resto de las energías.

Uno de los beneficios principales de la realización de este trabajo fue obtener todos los datos correspondientes a los factores de salida para el acelerador lineal modelo Trilogy del

servicio de radioterapia del HCC, ya que al tener todos estos parámetros para cualquier tamaño de campo así como para todos los aplicadores y energías disponibles del acelerador se puede asegurar un cálculo de dosis mucho más preciso y coherente con lo que se prescribe dado que hasta el momento no se tomaba en cuenta el hecho de que estuviese un inserto en el aplicador. Aunque los valores medidos no son muy diferentes a la unidad, el hecho de no ser 1 (uno) ya implica un cambio en las unidades monitor resultantes al usar los valores medidos de factores de salida para un cálculo de dosis, lo cual resulta de suma importancia dada la premisa de realizar cálculos cada vez más precisos.

Aun cuando no se tomaron los datos de factores de salida para campos irregulares, los campos rectangulares pueden adaptarse bien a las formas más comúnmente tratadas en el servicio de radioterapia del HCC con haces de electrones.

El Sistema de Planificación de tratamiento solo permite realizar cálculo de dosis a una SSD extendida máxima de 104 cm lo cual resulta en una limitación para tratamientos que puedan requerir una distancia fuente superficie mucho mayor a la estándar. Dicha limitante puede estar justificada, en la pérdida de uniformidad de la distribución de dosis y el aumento de la penumbra si el aplicador no se encuentra cercano a la superficie de entrada del haz.

Aunque el sistema de planificación de tratamiento presenta la limitación comentada anteriormente, otro de los grandes beneficios de esta investigación fue la obtención de los valores del parámetro SSD_{eff} para cada energía disponible del acelerador así como para cada aplicador, ya que al disponer de todos los datos necesarios se puede realizar un cálculo puntual de dosis siguiendo la expresión propuesta por la AAPM y de esta forma poder llevar a cabo el tratamiento directamente en la máquina.

El GGPB no toma en cuenta la dependencia de la distribución de dosis en profundidad con el tamaño de campo, lo cual resulta en una limitante importante a la hora de realizar un cálculo confiable cuando se utilizan tamaños de campo muy pequeños. Una recomendación puede ser, utilizar un sistema alternativo de verificación de unidades monitor como el cálculo puntual, para compararlo con el resultado del planificador y en caso de una diferencia porcentual mayor al 5%, se optaría por utilizar el valor de unidades monitor calculado puntualmente y se introduciría ese valor manualmente al sistema de planificación para dar el tratamiento de esta forma.

Una de las recomendaciones presentes en la bibliografía [22], respecto a los tamaños de campo pequeños es la medición de los factores de salida específicos para cada situación.

Basados en los resultados obtenidos en el presente trabajo y en los valores de R_{eq} calculados (Tabla 6.1), se recomienda realizar mediciones específicas de factores de salida para campos de tratamiento cuyo radio sea menor al de R_{eq} . Las medidas podrían realizarse utilizando maniqués de agua solida (PMMA) para reducir el tiempo y el esfuerzo que dicha medición requiere. Cabe destacar que tratamientos que utilicen tamaños de campo tan pequeños son poco frecuentes.

Siguiendo la recomendación planteada anteriormente es posible asegurar una exactitud mucho mayor en el cálculo puntual de unidades monitor, que conlleva a mayor exactitud entre la dosis prescrita y la dosis entregada.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Fletcher GH. Introduction. In: Tapley N, ed. (1976). Clinical applications of the Electron Beam. New York.
- [2] IAEA. (2005). Radiation oncology Physics. A handbook for teachers and students. Viena.
- [3] Sociedad Española de Física Médica. (2004). Fundamentos de Física Medica. Volúmen 3.
- [4] Faiz M. Khan. (2010). The Physics of Radiation Therapy. Philadelphia. 4th edition.
- [5] Mayles Philip, Nahum Alan, Resonwald Jean. (2007). Handbook of radiotherapy Physics. Florida.
- [6] Sternheimer RM. (1952). The density effect for the ionization loss in various materials. Phys rev.
- [7] International Commission on Radiation Units and Measurements. (1980). Radiation Quantities and Units. Report No. 33. Washington.
- [8] Rossi BB. (1956). High Energy Particles. Englewood Cliffs.
- [9] Knoll Glenn (1989). Radiation detection and Measurement. Michigan. 3th edition.
- [10] IAEA. (2005). Determinación de la dosis absorbida en radioterapia con haces externos. Colección de informes técnicos N° 398. Viena.
- [11] Sociedad Española de Física Médica. (2004). Fundamentos de Física Medica. Volumen 4.
- [12] Kawachi K. (1975). Calculation of electron dose distribution for radiotherapy treatment planning. Phys Med Biol.
- [13] Brahme A. (1985). Brief review of current algorithms for electron beam dose planning. In: Nahum AE, ed. The computation of Dose Distributions in Electron Beam Radiotherapy. Kunglav, Sweden.

- [14] Hogstrom KR, Starkschall G, Shiu AS. (1992). Dose calculation algorithms for electron beams. In: Purdy JA, ed. *Advances in Radiation Oncology Physics*. American Institute of Physics Monograph 19. New York.
- [15] Eyges L. (1948). Multiple scattering with energy loss. *Phys Rev*.
- [16] Faiz M. Khan. (2007). *Treatment Planning in Radiation Oncology*. Philadelphia. 2nd edition.
- [17] Varian Medical Systems, Inc. (2010). *Eclipse Algorithms Reference Guide*. California.
- [18] AAPM. (2014). *Monitor unit calculations for external photons and electron beams*.
- [19] Varian Medical Systems. (2013). *High Energy Installation Product Acceptance*. California.
- [20] AAPM. (2009). *Recommendations for clinical electron beam dosimetry: Supplement to the recommendations of Task Group 25*.
- [21] AAPM. (2011). *Small field electron beam dosimetry using MOSFET detector*.
- [22] Journal- Korean Physical Society. (2011). *Analysis of Output Factors with various Detectors in Small-field Electron-beam Radiotherapy*.

APÉNDICE A: FACTORES DE SALIDA

A continuación se muestran las tablas de resultados de los Factores de Salida medidos para un haz de electrones de 4 MeV para los distintos aplicadores disponibles.

	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20.0	0.817	0.852	0.857	0.858	0.857
30.0	0.852	0.890	0.895	0.896	0.894
40.0	0.857	0.895	0.900	0.901	0.899
50.0	0.858	0.896	0.901	0.901	0.900
60.0	0.857	0.894	0.899	0.900	0.898

Tabla A. 1. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 4 MeV usando un aplicador de $6 \times 6 \text{ cm}^2$ y normalizados respecto al campo de $15 \times 15 \text{ cm}^2$ y el aplicador de $15 \times 15 \text{ cm}^2$

	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20.0	0.873	0.931	0.942	0.946	0.946	0.942	0.943	0.942	0.942
30.0	0.931	0.992	1.004	1.008	1.008	1.005	1.005	1.004	1.003
40.0	0.942	1.004	1.017	1.021	1.021	1.017	1.018	1.017	1.016
50.0	0.946	1.008	1.021	1.025	1.025	1.021	1.021	1.021	1.020
60.0	0.946	1.008	1.021	1.025	1.025	1.021	1.021	1.021	1.020
70.0	0.942	1.005	1.017	1.021	1.021	1.017	1.018	1.017	1.016
80.0	0.943	1.005	1.018	1.021	1.021	1.018	1.018	1.018	1.017
90.0	0.942	1.004	1.017	1.021	1.021	1.017	1.018	1.017	1.016
100.0	0.942	1.003	1.016	1.020	1.020	1.016	1.017	1.016	1.015

Tabla A. 2. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 4 MeV usando un aplicador de $10 \times 10 \text{ cm}^2$ y normalizados respecto al campo de $15 \times 15 \text{ cm}^2$ y el aplicador de $15 \times 15 \text{ cm}^2$

	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0	110.0	120.0	130.0	140.0	150.0
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20.0	0.877	0.924	0.933	0.942	0.938	0.939	0.938	0.938	0.938	0.937	0.936	0.936	0.936	0.936
30.0	0.924	0.973	0.983	0.992	0.988	0.990	0.989	0.989	0.989	0.987	0.986	0.986	0.986	0.987
40.0	0.933	0.983	0.993	1.002	0.998	1.000	0.999	0.999	0.999	0.998	0.997	0.997	0.997	0.997
50.0	0.942	0.992	1.002	1.011	1.007	1.009	1.008	1.008	1.008	1.007	1.005	1.005	1.006	1.006
60.0	0.938	0.988	0.998	1.007	1.003	1.005	1.004	1.004	1.004	1.003	1.001	1.001	1.002	1.002
70.0	0.939	0.990	1.000	1.009	1.005	1.007	1.005	1.005	1.005	1.004	1.003	1.003	1.003	1.003
80.0	0.938	0.989	0.999	1.008	1.004	1.005	1.004	1.004	1.004	1.003	1.002	1.002	1.002	1.002
90.0	0.938	0.989	0.999	1.008	1.004	1.005	1.004	1.004	1.004	1.003	1.002	1.002	1.002	1.002
100.0	0.938	0.989	0.999	1.008	1.004	1.005	1.004	1.004	1.004	1.003	1.002	1.002	1.002	1.002
110.0	0.937	0.987	0.998	1.007	1.003	1.004	1.003	1.003	1.003	1.002	1.001	1.001	1.001	1.001
120.0	0.936	0.986	0.997	1.005	1.001	1.003	1.002	1.002	1.002	1.001	0.999	1.000	1.000	1.000
130.0	0.936	0.986	0.997	1.005	1.001	1.003	1.002	1.002	1.002	1.001	1.000	1.000	1.000	1.000
140.0	0.936	0.986	0.997	1.006	1.002	1.003	1.002	1.002	1.002	1.001	1.000	1.000	1.000	1.000
150.0	0.936	0.987	0.997	1.006	1.002	1.003	1.002	1.002	1.002	1.001	1.000	1.000	1.000	1.000

Tabla A. 3. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 4 MeV usando un aplicador de $15 \times 15 \text{ cm}^2$ y normalizados respecto al campo de $15 \times 15 \text{ cm}^2$ y el aplicador de $15 \times 15 \text{ cm}^2$

	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0	110.0	120.0	130.0	140.0	150.0
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20.0	0.853	0.914	0.933	0.938	0.939	0.940	0.939	0.939	0.938	0.938	0.937	0.938	0.939	0.939
30.0	0.914	0.980	1.000	1.006	1.006	1.008	1.007	1.006	1.006	1.005	1.005	1.005	1.006	1.007
40.0	0.933	1.000	1.021	1.027	1.027	1.029	1.028	1.027	1.026	1.026	1.025	1.026	1.027	1.028
50.0	0.938	1.006	1.027	1.033	1.033	1.035	1.033	1.033	1.032	1.032	1.031	1.032	1.033	1.034
60.0	0.939	1.006	1.027	1.033	1.033	1.035	1.034	1.033	1.033	1.032	1.031	1.032	1.033	1.034
70.0	0.940	1.008	1.029	1.035	1.035	1.037	1.036	1.035	1.035	1.034	1.033	1.034	1.035	1.036
80.0	0.939	1.007	1.028	1.033	1.034	1.036	1.034	1.034	1.033	1.033	1.032	1.033	1.034	1.035
90.0	0.939	1.006	1.027	1.033	1.033	1.035	1.034	1.033	1.033	1.032	1.032	1.032	1.033	1.034
100.0	0.938	1.006	1.026	1.032	1.033	1.035	1.033	1.033	1.032	1.032	1.031	1.032	1.033	1.033
110.0	0.938	1.005	1.026	1.032	1.032	1.034	1.033	1.032	1.032	1.031	1.030	1.031	1.032	1.033
120.0	0.937	1.005	1.025	1.031	1.031	1.033	1.032	1.032	1.031	1.030	1.030	1.031	1.031	1.032
130.0	0.938	1.005	1.026	1.032	1.032	1.034	1.033	1.032	1.032	1.031	1.031	1.032	1.032	1.033
140.0	0.939	1.006	1.027	1.033	1.033	1.035	1.034	1.033	1.033	1.032	1.031	1.032	1.033	1.034
150.0	0.939	1.007	1.028	1.034	1.034	1.036	1.035	1.034	1.033	1.033	1.032	1.033	1.034	1.035
160.0	0.939	1.006	1.027	1.033	1.033	1.035	1.034	1.033	1.033	1.032	1.032	1.032	1.033	1.034
170.0	0.938	1.006	1.026	1.032	1.033	1.034	1.033	1.033	1.032	1.031	1.031	1.032	1.033	1.033
180.0	0.937	1.005	1.026	1.032	1.032	1.034	1.032	1.032	1.031	1.031	1.030	1.031	1.032	1.033
190.0	0.937	1.004	1.025	1.031	1.031	1.033	1.032	1.031	1.031	1.030	1.030	1.030	1.031	1.032
200.0	0.936	1.003	1.024	1.030	1.030	1.032	1.031	1.030	1.030	1.029	1.029	1.030	1.030	1.031

	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20.0	0.939	0.938	0.937	0.937	0.936
30.0	1.006	1.006	1.005	1.004	1.003
40.0	1.027	1.026	1.026	1.025	1.024
50.0	1.033	1.032	1.032	1.031	1.030
60.0	1.033	1.033	1.032	1.031	1.030
70.0	1.035	1.034	1.034	1.033	1.032
80.0	1.034	1.033	1.032	1.032	1.031
90.0	1.033	1.033	1.032	1.031	1.030
100.0	1.033	1.032	1.031	1.031	1.030
110.0	1.032	1.031	1.031	1.030	1.029
120.0	1.032	1.031	1.030	1.030	1.029
130.0	1.032	1.032	1.031	1.030	1.030
140.0	1.033	1.033	1.032	1.031	1.030
150.0	1.034	1.033	1.033	1.032	1.031
160.0	1.033	1.033	1.032	1.031	1.031
170.0	1.033	1.032	1.031	1.031	1.030
180.0	1.032	1.031	1.031	1.030	1.029
190.0	1.031	1.031	1.030	1.029	1.028
200.0	1.031	1.030	1.029	1.028	1.028

Tabla A. 4. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 4MeV usando un aplicador de 20x20 cm² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm² y el aplicador de 15x15 cm²

	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0	110.0	120.0	130.0	140.0	150.0
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20.0	0.921	0.977	0.989	0.996	0.996	0.997	0.997	0.997	0.997	0.996	0.996	0.996	0.995	0.995
30.0	0.977	1.036	1.049	1.056	1.057	1.057	1.057	1.057	1.057	1.057	1.056	1.056	1.055	1.055
40.0	0.989	1.049	1.063	1.070	1.070	1.071	1.071	1.071	1.071	1.070	1.070	1.069	1.069	1.069
50.0	0.996	1.056	1.070	1.077	1.077	1.078	1.078	1.078	1.078	1.078	1.077	1.077	1.076	1.076
60.0	0.996	1.057	1.070	1.077	1.078	1.079	1.079	1.078	1.078	1.078	1.077	1.077	1.076	1.076
70.0	0.997	1.057	1.071	1.078	1.079	1.079	1.079	1.079	1.079	1.079	1.078	1.078	1.077	1.077
80.0	0.997	1.057	1.071	1.078	1.079	1.079	1.079	1.079	1.079	1.079	1.078	1.078	1.077	1.077
90.0	0.997	1.057	1.071	1.078	1.078	1.079	1.079	1.079	1.079	1.078	1.078	1.078	1.077	1.077
100.0	0.997	1.057	1.071	1.078	1.078	1.079	1.079	1.079	1.079	1.078	1.078	1.077	1.077	1.077
110.0	0.996	1.057	1.070	1.078	1.078	1.079	1.079	1.078	1.078	1.078	1.077	1.077	1.077	1.076
120.0	0.996	1.056	1.070	1.077	1.077	1.078	1.078	1.078	1.078	1.077	1.077	1.076	1.076	1.076
130.0	0.996	1.056	1.069	1.077	1.077	1.078	1.078	1.078	1.077	1.077	1.076	1.076	1.076	1.075
140.0	0.995	1.055	1.069	1.076	1.076	1.077	1.077	1.077	1.077	1.077	1.076	1.076	1.075	1.075
150.0	0.995	1.055	1.069	1.076	1.076	1.077	1.077	1.077	1.077	1.076	1.076	1.075	1.075	1.074
160.0	0.995	1.055	1.068	1.076	1.076	1.077	1.077	1.077	1.076	1.076	1.075	1.075	1.075	1.074
170.0	0.994	1.054	1.068	1.075	1.076	1.076	1.076	1.076	1.076	1.076	1.075	1.075	1.074	1.074
180.0	0.994	1.054	1.068	1.075	1.075	1.076	1.076	1.076	1.076	1.075	1.075	1.074	1.074	1.074
190.0	0.994	1.054	1.067	1.075	1.075	1.076	1.076	1.076	1.076	1.075	1.074	1.074	1.074	1.073
200.0	0.994	1.054	1.067	1.074	1.075	1.076	1.076	1.075	1.075	1.075	1.074	1.074	1.073	1.073
210.0	0.993	1.053	1.066	1.074	1.074	1.075	1.075	1.074	1.074	1.074	1.073	1.073	1.072	1.072
220.0	0.992	1.052	1.065	1.073	1.073	1.074	1.074	1.073	1.073	1.073	1.072	1.072	1.072	1.071
230.0	0.991	1.051	1.064	1.072	1.072	1.073	1.073	1.073	1.072	1.072	1.071	1.071	1.071	1.070
240.0	0.990	1.050	1.063	1.071	1.071	1.072	1.072	1.072	1.071	1.071	1.070	1.070	1.070	1.069
250.0	0.989	1.049	1.062	1.070	1.070	1.071	1.071	1.071	1.070	1.070	1.069	1.069	1.069	1.068

	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	210.0	220.0	230.0	240.0	250.0
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20.0	0.995	0.994	0.994	0.994	0.994	0.993	0.992	0.991	0.990	0.989
30.0	1.055	1.054	1.054	1.054	1.054	1.053	1.052	1.051	1.050	1.049
40.0	1.068	1.068	1.068	1.067	1.067	1.066	1.065	1.064	1.063	1.062
50.0	1.076	1.075	1.075	1.075	1.074	1.074	1.073	1.072	1.071	1.070
60.0	1.076	1.076	1.075	1.075	1.075	1.074	1.073	1.072	1.071	1.070
70.0	1.077	1.076	1.076	1.076	1.076	1.074	1.073	1.072	1.071	1.070
80.0	1.077	1.076	1.076	1.076	1.076	1.075	1.074	1.073	1.072	1.071
90.0	1.077	1.076	1.076	1.076	1.075	1.074	1.073	1.073	1.072	1.071
100.0	1.076	1.076	1.076	1.076	1.075	1.074	1.073	1.072	1.071	1.070
110.0	1.076	1.076	1.075	1.075	1.075	1.074	1.073	1.072	1.071	1.070
120.0	1.075	1.075	1.075	1.074	1.074	1.073	1.072	1.071	1.070	1.069
130.0	1.075	1.075	1.074	1.074	1.074	1.073	1.072	1.071	1.070	1.069
140.0	1.075	1.074	1.074	1.074	1.073	1.072	1.072	1.071	1.070	1.069
150.0	1.074	1.074	1.074	1.073	1.073	1.072	1.071	1.070	1.069	1.068
160.0	1.074	1.074	1.073	1.073	1.073	1.072	1.071	1.070	1.069	1.068
170.0	1.074	1.073	1.073	1.073	1.073	1.072	1.071	1.070	1.069	1.068
180.0	1.073	1.073	1.073	1.073	1.072	1.071	1.070	1.069	1.068	1.067
190.0	1.073	1.073	1.073	1.072	1.072	1.071	1.070	1.069	1.068	1.067
200.0	1.073	1.073	1.072	1.072	1.072	1.071	1.070	1.069	1.068	1.067
210.0	1.072	1.072	1.071	1.071	1.071	1.070	1.069	1.068	1.067	1.066
220.0	1.071	1.071	1.070	1.070	1.070	1.069	1.068	1.067	1.066	1.065
230.0	1.070	1.070	1.069	1.069	1.069	1.068	1.067	1.066	1.065	1.064
240.0	1.069	1.069	1.068	1.068	1.068	1.067	1.066	1.065	1.064	1.063
250.0	1.068	1.068	1.067	1.067	1.067	1.066	1.065	1.064	1.063	1.062

Tabla A. 5. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 4 MeV usando un aplicador de 25x25 cm² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm² y el aplicador de 15x15 cm²

Los resultados de los Factores de Salida medidos para un haz de electrones de 6 MeV para los distintos aplicadores disponibles fueron los siguientes:

	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20.0	0.830	0.883	0.897	0.902	0.897
30.0	0.883	0.939	0.954	0.959	0.954
40.0	0.897	0.954	0.970	0.975	0.970
50.0	0.902	0.959	0.975	0.979	0.975
60.0	0.897	0.954	0.970	0.975	0.970

Tabla A. 6. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 6 MeV usando un aplicador de $6 \times 6 \text{ cm}^2$ y normalizados respecto al campo de $15 \times 15 \text{ cm}^2$ y el aplicador de $15 \times 15 \text{ cm}^2$

	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20.0	0.843	0.900	0.918	0.924	0.923	0.920	0.920	0.919	0.919
30.0	0.900	0.961	0.979	0.986	0.985	0.982	0.982	0.981	0.980
40.0	0.918	0.979	0.998	1.005	1.005	1.001	1.001	1.000	0.999
50.0	0.924	0.986	1.005	1.012	1.011	1.008	1.007	1.007	1.006
60.0	0.923	0.985	1.005	1.011	1.011	1.008	1.007	1.006	1.006
70.0	0.920	0.982	1.001	1.008	1.008	1.004	1.004	1.003	1.002
80.0	0.920	0.982	1.001	1.007	1.007	1.004	1.003	1.003	1.002
90.0	0.919	0.981	1.000	1.007	1.006	1.003	1.003	1.002	1.001
100.0	0.919	0.980	0.999	1.006	1.006	1.002	1.002	1.001	1.000

Tabla A. 7. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 6 MeV usando un aplicador de $10 \times 10 \text{ cm}^2$ y normalizados respecto al campo de $15 \times 15 \text{ cm}^2$ y el aplicador de $15 \times 15 \text{ cm}^2$

	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0	110.0	120.0	130.0	140.0	150.0
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20.0	0.823	0.887	0.905	0.914	0.911	0.912	0.911	0.911	0.910	0.910	0.909	0.908	0.908	0.907
30.0	0.887	0.956	0.975	0.985	0.982	0.983	0.982	0.982	0.981	0.980	0.979	0.979	0.978	0.978
40.0	0.905	0.975	0.995	1.005	1.002	1.003	1.002	1.001	1.001	1.000	0.999	0.998	0.998	0.997
50.0	0.914	0.985	1.005	1.015	1.012	1.013	1.002	1.006	1.011	1.010	1.009	1.008	1.008	1.007
60.0	0.911	0.982	1.002	1.012	1.009	1.010	1.009	1.008	1.008	1.007	1.006	1.005	1.005	1.004
70.0	0.912	0.983	1.003	1.013	1.010	1.011	1.010	1.009	1.009	1.008	1.007	1.006	1.006	1.005
80.0	0.911	0.982	1.002	1.012	1.009	1.010	1.009	1.008	1.008	1.007	1.006	1.005	1.005	1.004
90.0	0.911	0.982	1.001	1.011	1.008	1.009	1.008	1.008	1.007	1.006	1.005	1.005	1.004	1.004
100.0	0.910	0.981	1.001	1.011	1.008	1.009	1.008	1.007	1.007	1.006	1.005	1.004	1.004	1.003
110.0	0.910	0.980	1.000	1.010	1.007	1.008	1.007	1.006	1.006	1.005	1.004	1.003	1.003	1.002
120.0	0.909	0.979	0.999	1.009	1.006	1.007	1.006	1.005	1.005	1.004	1.003	1.002	1.002	1.001
130.0	0.908	0.979	0.998	1.008	1.005	1.006	1.005	1.005	1.004	1.003	1.002	1.002	1.001	1.001
140.0	0.908	0.978	0.998	1.008	1.005	1.006	1.005	1.004	1.004	1.003	1.002	1.001	1.001	1.000
150.0	0.907	0.978	0.997	1.007	1.004	1.005	1.004	1.004	1.003	1.002	1.001	1.001	1.000	1.000

Tabla A. 8. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 6 MeV usando un aplicador de $15 \times 15 \text{ cm}^2$ y normalizados respecto al campo de $15 \times 15 \text{ cm}^2$ y el aplicador de $15 \times 15 \text{ cm}^2$

	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0	110.0	120.0	130.0	140.0	150.0
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20.0	0.811	0.873	0.899	0.905	0.905	0.908	0.907	0.906	0.905	0.905	0.904	0.904	0.904	0.904
30.0	0.873	0.939	0.968	0.974	0.974	0.977	0.976	0.975	0.974	0.974	0.973	0.973	0.973	0.972
40.0	0.899	0.968	0.997	1.003	1.004	1.007	1.006	1.005	1.004	1.004	1.003	1.003	1.002	1.002
50.0	0.905	0.974	1.003	1.010	1.010	1.013	1.012	1.011	1.010	1.010	1.009	1.009	1.008	1.008
60.0	0.905	0.974	1.004	1.010	1.010	1.013	1.012	1.011	1.010	1.010	1.009	1.009	1.009	1.008
70.0	0.908	0.977	1.007	1.013	1.013	1.016	1.015	1.015	1.014	1.013	1.012	1.012	1.012	1.012
80.0	0.907	0.976	1.006	1.012	1.012	1.015	1.015	1.014	1.013	1.012	1.012	1.011	1.011	1.011
90.0	0.906	0.975	1.005	1.011	1.011	1.015	1.014	1.013	1.012	1.011	1.011	1.010	1.010	1.010
100.0	0.905	0.974	1.004	1.010	1.010	1.014	1.013	1.012	1.011	1.010	1.010	1.009	1.009	1.009
110.0	0.905	0.974	1.004	1.010	1.010	1.013	1.012	1.011	1.010	1.010	1.009	1.009	1.009	1.008
120.0	0.904	0.973	1.003	1.009	1.009	1.012	1.012	1.011	1.010	1.009	1.008	1.008	1.008	1.008
130.0	0.904	0.973	1.003	1.009	1.009	1.012	1.011	1.010	1.009	1.009	1.008	1.008	1.008	1.007
140.0	0.904	0.973	1.002	1.008	1.009	1.012	1.011	1.010	1.009	1.009	1.008	1.008	1.007	1.007
150.0	0.904	0.972	1.002	1.008	1.008	1.012	1.011	1.010	1.009	1.008	1.008	1.007	1.007	1.007
160.0	0.903	0.972	1.002	1.008	1.008	1.011	1.010	1.009	1.009	1.008	1.007	1.007	1.007	1.006
170.0	0.903	0.972	1.001	1.007	1.008	1.011	1.010	1.009	1.008	1.008	1.007	1.007	1.006	1.006
180.0	0.903	0.971	1.001	1.007	1.007	1.010	1.010	1.009	1.008	1.007	1.007	1.006	1.006	1.006
190.0	0.902	0.971	1.001	1.007	1.007	1.010	1.009	1.008	1.007	1.007	1.006	1.006	1.006	1.005
200.0	0.902	0.971	1.000	1.006	1.007	1.010	1.009	1.008	1.007	1.006	1.006	1.006	1.005	1.005

	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20.0	0.903	0.903	0.903	0.902	0.902
30.0	0.972	0.972	0.971	0.971	0.971
40.0	1.002	1.001	1.001	1.001	1.000
50.0	1.008	1.007	1.007	1.007	1.006
60.0	1.008	1.008	1.007	1.007	1.007
70.0	1.011	1.011	1.010	1.010	1.010
80.0	1.010	1.010	1.010	1.009	1.009
90.0	1.009	1.009	1.009	1.008	1.008
100.0	1.009	1.008	1.008	1.007	1.007
110.0	1.008	1.008	1.007	1.007	1.006
120.0	1.007	1.007	1.007	1.006	1.006
130.0	1.007	1.007	1.006	1.006	1.006
140.0	1.007	1.006	1.006	1.006	1.005
150.0	1.006	1.006	1.006	1.005	1.005
160.0	1.006	1.006	1.005	1.005	1.005
170.0	1.006	1.005	1.005	1.005	1.004
180.0	1.005	1.005	1.005	1.004	1.004
190.0	1.005	1.005	1.004	1.004	1.004

Tabla A. 9. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 6MeV usando un aplicador de 20x20 cm² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm² y el aplicador de 15x15 cm²

	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0	110.0	120.0	130.0	140.0	150.0
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20.0	0.862	0.913	0.929	0.935	0.935	0.936	0.936	0.936	0.935	0.935	0.934	0.934	0.933	0.933
30.0	0.913	0.997	0.983	0.990	0.990	0.991	0.990	0.990	0.990	0.990	0.989	0.988	0.988	0.987
40.0	0.929	0.983	1.000	1.007	1.008	1.009	1.008	1.008	1.008	1.007	1.006	1.006	1.005	1.005
50.0	0.935	0.990	1.007	1.014	1.014	1.015	1.015	1.015	1.014	1.014	1.013	1.013	1.012	1.012
60.0	0.935	0.990	1.008	1.014	1.015	1.016	1.015	1.015	1.015	1.014	1.013	1.013	1.012	1.012
70.0	0.936	0.991	1.009	1.015	1.016	1.017	1.016	1.016	1.016	1.015	1.014	1.014	1.013	1.013
80.0	0.936	0.990	1.008	1.015	1.015	1.016	1.015	1.015	1.015	1.014	1.014	1.013	1.013	1.012
90.0	0.936	0.990	1.008	1.015	1.015	1.016	1.015	1.015	1.015	1.014	1.013	1.013	1.012	1.012
100.0	0.935	0.990	1.008	1.014	1.015	1.016	1.015	1.015	1.015	1.014	1.013	1.013	1.012	1.012
110.0	0.935	0.990	1.007	1.014	1.014	1.015	1.014	1.014	1.014	1.013	1.013	1.012	1.012	1.011
120.0	0.934	0.989	1.006	1.013	1.013	1.014	1.014	1.013	1.013	1.013	1.012	1.012	1.011	1.010
130.0	0.934	0.988	1.006	1.013	1.013	1.014	1.013	1.013	1.013	1.012	1.012	1.011	1.010	1.010
140.0	0.933	0.988	1.005	1.012	1.012	1.013	1.013	1.012	1.012	1.012	1.011	1.010	1.010	1.009
150.0	0.933	0.987	1.005	1.012	1.012	1.013	1.012	1.012	1.012	1.011	1.010	1.010	1.009	1.009
160.0	0.932	0.987	1.004	1.011	1.011	1.012	1.012	1.012	1.011	1.011	1.010	1.010	1.009	1.009
170.0	0.932	0.987	1.004	1.011	1.011	1.012	1.011	1.011	1.011	1.010	1.010	1.009	1.009	1.008
180.0	0.932	0.986	1.004	1.010	1.011	1.012	1.011	1.011	1.011	1.010	1.009	1.009	1.008	1.008
190.0	0.931	0.986	1.003	1.010	1.010	1.011	1.011	1.010	1.010	1.010	1.009	1.009	1.008	1.007
200.0	0.931	0.986	1.003	1.010	1.010	1.011	1.010	1.010	1.010	1.009	1.009	1.008	1.008	1.007
210.0	0.931	0.985	1.003	1.009	1.010	1.011	1.010	1.010	1.010	1.009	1.008	1.008	1.007	1.007
220.0	0.931	0.985	1.002	1.009	1.009	1.010	1.010	1.010	1.009	1.009	1.008	1.008	1.007	1.007
230.0	0.930	0.985	1.002	1.009	1.009	1.010	1.009	1.009	1.009	1.009	1.008	1.007	1.007	1.006
240.0	0.930	0.985	1.002	1.009	1.009	1.010	1.009	1.009	1.009	1.008	1.008	1.007	1.007	1.006
250.0	0.930	0.984	1.002	1.008	1.009	1.010	1.009	1.009	1.009	1.008	1.007	1.007	1.006	1.006

	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	210.0	220.0	230.0	240.0	250.0
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20.0	0.932	0.932	0.932	0.931	0.931	0.931	0.931	0.930	0.930	0.930
30.0	0.987	0.987	0.986	0.986	0.986	0.985	0.985	0.985	0.985	0.984
40.0	1.004	1.004	1.004	1.003	1.003	1.003	1.002	1.002	1.002	1.002
50.0	1.011	1.011	1.010	1.010	1.010	1.009	1.009	1.009	1.009	1.008
60.0	1.011	1.011	1.011	1.010	1.010	1.010	1.009	1.009	1.009	1.009
70.0	1.012	1.012	1.012	1.011	1.011	1.011	1.010	1.010	1.010	1.010
80.0	1.012	1.011	1.011	1.011	1.010	1.010	1.010	1.009	1.009	1.009
90.0	1.012	1.011	1.011	1.010	1.010	1.010	1.010	1.009	1.009	1.009
100.0	1.011	1.011	1.011	1.010	1.010	1.010	1.009	1.009	1.009	1.009
110.0	1.011	1.010	1.010	1.010	1.009	1.009	1.009	1.009	1.008	1.008
120.0	1.010	1.010	1.009	1.009	1.009	1.008	1.008	1.008	1.008	1.007
130.0	1.010	1.009	1.009	1.009	1.008	1.008	1.008	1.007	1.007	1.007
140.0	1.009	1.009	1.008	1.008	1.008	1.007	1.007	1.007	1.007	1.006
150.0	1.009	1.008	1.008	1.007	1.007	1.007	1.007	1.006	1.006	1.006
160.0	1.008	1.008	1.007	1.007	1.007	1.006	1.006	1.006	1.006	1.005
170.0	1.008	1.007	1.007	1.007	1.006	1.006	1.006	1.006	1.005	1.005
180.0	1.007	1.007	1.007	1.006	1.006	1.006	1.005	1.005	1.005	1.005
190.0	1.007	1.007	1.006	1.006	1.006	1.005	1.005	1.005	1.005	1.004
200.0	1.007	1.006	1.006	1.006	1.005	1.005	1.005	1.004	1.004	1.004
210.0	1.006	1.006	1.006	1.005	1.005	1.005	1.004	1.004	1.004	1.004
220.0	1.006	1.006	1.005	1.005	1.005	1.004	1.004	1.004	1.004	1.003
230.0	1.006	1.006	1.005	1.005	1.004	1.004	1.004	1.004	1.003	1.003
240.0	1.006	1.005	1.005	1.005	1.004	1.004	1.004	1.003	1.003	1.003
250.0	1.005	1.005	1.005	1.004	1.004	1.004	1.003	1.003	1.003	1.003

Tabla A. 10. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 6 MeV usando un aplicador de 25x25 cm² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm² y el aplicador de 15x15 cm²

Los resultados de los Factores de Salida medidos para un haz de electrones de 12 MeV para los distintos aplicadores disponibles fueron los siguientes:

	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20.0	0.775	0.836	0.865	0.881	0.890
30.0	0.836	0.901	0.933	0.949	0.959
40.0	0.865	0.933	0.966	0.983	0.993
50.0	0.881	0.949	0.983	1.000	1.011
60.0	0.890	0.959	0.993	1.011	1.022

Tabla A. 11. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 12 MeV usando un aplicador de 6x6 cm² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm² y el aplicador de 15x15 cm²

	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20.0	0.759	0.830	0.864	0.881	0.884	0.883	0.883	0.883	0.883
30.0	0.830	0.907	0.944	0.963	0.967	0.965	0.966	0.966	0.966
40.0	0.964	0.944	0.983	1.002	1.006	1.005	1.005	1.005	1.005
50.0	0.881	0.963	1.002	1.022	1.026	1.024	1.025	1.025	1.025
60.0	0.884	0.967	1.006	1.026	1.031	1.028	1.029	1.029	1.029
70.0	0.883	0.965	1.005	1.024	1.028	1.027	1.027	1.027	1.027
80.0	0.883	0.966	1.005	1.025	1.029	1.027	1.028	1.028	1.028
90.0	0.883	0.966	1.005	1.025	1.029	1.027	1.028	1.028	1.028
100.0	0.883	0.966	1.005	1.025	1.029	1.027	1.028	1.028	1.028

Tabla A. 12. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 12 MeV usando un aplicador de 10x10 cm² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm² y el aplicador de 15x15 cm²

	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0	110.0	120.0	130.0	140.0	150.0
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20.0	0.723	0.803	0.836	0.849	0.855	0.861	0.862	0.860	0.857	0.857	0.857	0.855	0.853	0.850
30.0	0.803	0.892	0.928	0.943	0.949	0.956	0.957	0.954	0.952	0.952	0.952	0.949	0.947	0.944
40.0	0.836	0.928	0.966	0.981	0.988	0.995	0.996	0.993	0.990	0.990	0.990	0.988	0.985	0.983
50.0	0.849	0.943	0.981	0.997	1.004	1.010	1.012	1.009	1.006	1.006	1.006	1.003	1.001	0.998
60.0	0.855	0.949	0.988	1.004	1.010	1.017	1.019	1.016	1.013	1.013	1.013	1.010	1.008	1.005
70.0	0.861	0.956	0.995	1.010	1.017	1.024	1.026	1.023	1.020	1.020	1.020	1.017	1.015	1.012
80.0	0.862	0.957	0.996	1.012	1.019	1.026	1.027	1.024	1.021	1.021	1.021	1.019	1.016	1.013
90.0	0.860	0.954	0.993	1.009	1.016	1.023	1.024	1.021	1.018	1.018	1.018	1.016	1.013	1.011
100.0	0.857	0.952	0.990	1.006	1.013	1.020	1.021	1.018	1.015	1.015	1.015	1.013	1.010	1.008
110.0	0.857	0.952	0.990	1.006	1.013	1.020	1.021	1.018	1.015	1.015	1.015	1.013	1.010	1.008
120.0	0.857	0.952	0.990	1.006	1.013	1.020	1.021	1.018	1.015	1.015	1.015	1.013	1.010	1.008
130.0	0.855	0.949	0.988	1.003	1.010	1.017	1.019	1.016	1.013	1.013	1.013	1.010	1.008	1.005
140.0	0.853	0.947	0.985	1.001	1.008	1.015	1.016	1.013	1.010	1.010	1.010	1.008	1.005	1.003
150.0	0.850	0.944	0.983	0.998	1.005	1.012	1.013	1.011	1.008	1.008	1.008	1.005	1.003	1.000

Tabla A. 13. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 12 MeV usando un aplicador de 15x15 cm² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm² y el aplicador de 15x15 cm²

	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0	110.0	120.0	130.0	140.0	150.0
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20.0	0.701	0.773	0.812	0.828	0.835	0.840	0.840	0.839	0.838	0.837	0.836	0.836	0.835	0.834
30.0	0.773	0.851	0.895	0.912	0.920	0.926	0.926	0.925	0.924	0.923	0.922	0.921	0.920	0.919
40.0	0.812	0.895	0.941	0.959	0.967	0.973	0.973	0.972	0.971	0.970	0.969	0.968	0.967	0.966
50.0	0.828	0.912	0.959	0.977	0.986	0.992	0.992	0.991	0.990	0.989	0.988	0.987	0.986	0.985
60.0	0.835	0.920	0.967	0.986	0.994	1.001	1.001	0.999	0.998	0.997	0.996	0.995	0.994	0.993
70.0	0.840	0.926	0.973	0.992	1.001	1.007	1.007	1.006	1.004	1.003	1.002	1.001	1.000	0.999
80.0	0.840	0.926	0.973	0.992	1.001	1.007	1.007	1.006	1.004	1.003	1.002	1.001	1.000	0.999
90.0	0.839	0.925	0.972	0.991	0.999	1.006	1.006	1.004	1.003	1.002	1.001	1.000	0.999	0.998
100.0	0.838	0.924	0.971	0.990	0.998	1.004	1.004	1.003	1.002	1.001	1.000	0.999	0.998	0.997
110.0	0.837	0.923	0.970	0.989	0.997	1.003	1.003	1.002	1.001	1.000	0.999	0.998	0.997	0.996
120.0	0.836	0.922	0.969	0.988	0.996	1.002	1.002	1.001	1.000	0.999	0.998	0.997	0.996	0.995
130.0	0.836	0.921	0.968	0.987	0.995	1.001	1.001	1.000	0.999	0.998	0.997	0.996	0.995	0.994
140.0	0.835	0.920	0.967	0.986	0.994	1.000	1.000	0.999	0.998	0.997	0.996	0.995	0.994	0.993
150.0	0.834	0.919	0.966	0.985	0.993	0.999	0.999	0.998	0.997	0.996	0.995	0.994	0.993	0.992
160.0	0.834	0.918	0.965	0.984	0.993	0.999	0.999	0.998	0.996	0.995	0.994	0.993	0.992	0.991
170.0	0.833	0.918	0.965	0.983	0.992	0.998	0.998	0.997	0.996	0.995	0.994	0.993	0.992	0.991
180.0	0.832	0.917	0.964	0.983	0.991	0.997	0.997	0.996	0.995	0.994	0.993	0.992	0.991	0.990
190.0	0.832	0.916	0.963	0.982	0.990	0.997	0.997	0.995	0.994	0.993	0.992	0.991	0.990	0.989
200.0	0.831	0.916	0.963	0.981	0.990	0.996	0.996	0.995	0.994	0.993	0.991	0.990	0.990	0.989

	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20.0	0.834	0.833	0.832	0.832	0.831
30.0	0.918	0.918	0.917	0.916	0.916
40.0	0.965	0.965	0.964	0.963	0.963
50.0	0.984	0.983	0.983	0.982	0.981
60.0	0.993	0.992	0.991	0.990	0.990
70.0	0.999	0.998	0.997	0.997	0.996
80.0	0.999	0.998	0.997	0.997	0.996
90.0	0.998	0.997	0.996	0.995	0.995
100.0	0.996	0.996	0.995	0.994	0.994
110.0	0.995	0.995	0.994	0.993	0.993
120.0	0.994	0.994	0.993	0.992	0.991
130.0	0.993	0.993	0.992	0.991	0.990
140.0	0.992	0.992	0.991	0.990	0.990
150.0	0.991	0.991	0.990	0.989	0.989
160.0	0.991	0.990	0.989	0.989	0.988
170.0	0.990	0.989	0.989	0.988	0.987
180.0	0.989	0.989	0.988	0.987	0.986
190.0	0.989	0.988	0.987	0.986	0.986
200.0	0.988	0.987	0.986	0.986	0.985

Tabla A. 14. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 12MeV usando un aplicador de 20x20 cm² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm² y el aplicador de 15x15 cm²

	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0	110.0	120.0	130.0	140.0	150.0
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20.0	0.766	0.824	0.849	0.863	0.866	0.869	0.869	0.869	0.869	0.868	0.866	0.866	0.865	0.864
30.0	0.824	0.887	0.914	0.929	0.932	0.935	0.936	0.935	0.935	0.934	0.933	0.932	0.931	0.930
40.0	0.849	0.914	0.942	0.957	0.961	0.964	0.964	0.964	0.964	0.963	0.961	0.960	0.960	0.959
50.0	0.863	0.929	0.957	0.972	0.976	0.979	0.979	0.979	0.979	0.978	0.976	0.975	0.975	0.974
60.0	0.866	0.932	0.961	0.976	0.979	0.983	0.983	0.983	0.983	0.981	0.980	0.979	0.978	0.977
70.0	0.869	0.935	0.964	0.979	0.983	0.986	0.986	0.986	0.986	0.984	0.983	0.982	0.981	0.980
80.0	0.869	0.936	0.964	0.979	0.983	0.986	0.986	0.986	0.986	0.985	0.983	0.982	0.981	0.981
90.0	0.869	0.935	0.964	0.979	0.983	0.986	0.986	0.986	0.986	0.984	0.983	0.982	0.981	0.980
100.0	0.869	0.935	0.964	0.979	0.983	0.986	0.986	0.986	0.986	0.984	0.983	0.982	0.981	0.980
110.0	0.868	0.934	0.963	0.978	0.981	0.984	0.985	0.984	0.984	0.983	0.982	0.981	0.980	0.979
120.0	0.866	0.933	0.961	0.976	0.980	0.983	0.983	0.983	0.983	0.982	0.981	0.980	0.979	0.978
130.0	0.866	0.932	0.960	0.975	0.979	0.982	0.982	0.982	0.982	0.981	0.980	0.979	0.978	0.977
140.0	0.865	0.931	0.960	0.975	0.978	0.981	0.981	0.981	0.981	0.980	0.979	0.978	0.977	0.976
150.0	0.864	0.930	0.959	0.974	0.977	0.980	0.981	0.980	0.980	0.979	0.978	0.977	0.976	0.975
160.0	0.863	0.930	0.958	0.973	0.977	0.980	0.980	0.980	0.980	0.978	0.977	0.976	0.975	0.974
170.0	0.863	0.929	0.957	0.972	0.976	0.979	0.979	0.979	0.979	0.978	0.976	0.976	0.975	0.974
180.0	0.862	0.928	0.957	0.972	0.975	0.978	0.979	0.978	0.978	0.977	0.976	0.975	0.974	0.973
190.0	0.862	0.928	0.956	0.971	0.975	0.978	0.978	0.978	0.978	0.976	0.975	0.974	0.973	0.972
200.0	0.861	0.927	0.955	0.970	0.974	0.977	0.977	0.977	0.977	0.976	0.975	0.974	0.973	0.972
210.0	0.861	0.927	0.955	0.970	0.974	0.973	0.977	0.977	0.977	0.976	0.974	0.973	0.972	0.971
220.0	0.861	0.927	0.955	0.970	0.973	0.969	0.977	0.977	0.977	0.975	0.974	0.973	0.972	0.971
230.0	0.860	0.926	0.955	0.970	0.973	0.964	0.977	0.976	0.976	0.975	0.974	0.973	0.972	0.971
240.0	0.860	0.926	0.954	0.969	0.973	0.960	0.976	0.976	0.976	0.975	0.974	0.973	0.972	0.971
250.0	0.860	0.926	0.954	0.969	0.973	0.956	0.976	0.976	0.976	0.975	0.973	0.972	0.972	0.971

	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	210.0	220.0	230.0	240.0	250.0
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20.0	0.863	0.863	0.862	0.862	0.861	0.861	0.861	0.860	0.860	0.860
30.0	0.930	0.929	0.928	0.928	0.927	0.927	0.927	0.926	0.926	0.926
40.0	0.958	0.957	0.957	0.956	0.955	0.955	0.955	0.955	0.954	0.954
50.0	0.973	0.972	0.972	0.971	0.970	0.970	0.970	0.970	0.969	0.969
60.0	0.977	0.976	0.975	0.975	0.974	0.974	0.973	0.973	0.973	0.973
70.0	0.980	0.979	0.978	0.978	0.977	0.977	0.977	0.976	0.976	0.976
80.0	0.980	0.979	0.979	0.978	0.977	0.977	0.977	0.977	0.976	0.976
90.0	0.980	0.979	0.978	0.978	0.977	0.977	0.977	0.976	0.976	0.976
100.0	0.980	0.979	0.978	0.978	0.977	0.977	0.977	0.976	0.976	0.976
110.0	0.978	0.978	0.977	0.976	0.976	0.976	0.975	0.975	0.975	0.975
120.0	0.977	0.976	0.976	0.975	0.975	0.974	0.974	0.974	0.974	0.973
130.0	0.976	0.976	0.975	0.974	0.974	0.973	0.973	0.973	0.973	0.972
140.0	0.975	0.975	0.974	0.973	0.973	0.972	0.972	0.972	0.972	0.972
150.0	0.974	0.974	0.973	0.972	0.972	0.971	0.971	0.971	0.971	0.971
160.0	0.974	0.973	0.972	0.972	0.971	0.971	0.971	0.970	0.970	0.970
170.0	0.973	0.972	0.972	0.971	0.970	0.970	0.970	0.970	0.970	0.969
180.0	0.972	0.972	0.971	0.970	0.970	0.970	0.969	0.969	0.969	0.969
190.0	0.972	0.971	0.970	0.970	0.969	0.969	0.969	0.968	0.968	0.968
200.0	0.971	0.970	0.970	0.969	0.968	0.968	0.968	0.968	0.968	0.967
210.0	0.971	0.970	0.970	0.969	0.968	0.968	0.968	0.968	0.967	0.967
220.0	0.971	0.970	0.969	0.969	0.968	0.968	0.968	0.967	0.967	0.967
230.0	0.970	0.970	0.969	0.968	0.968	0.968	0.967	0.967	0.967	0.967
240.0	0.970	0.970	0.969	0.968	0.968	0.967	0.967	0.967	0.967	0.966
250.0	0.970	0.969	0.969	0.968	0.967	0.967	0.967	0.967	0.966	0.966

Tabla A. 15. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 12 MeV usando un aplicador de 25x25 cm² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm² y el aplicador de 15x15 cm²

Los resultados de los Factores de Salida medidos para un haz de electrones de 15 MeV para los distintos aplicadores disponibles fueron los siguientes:

	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20.0	0.715	0.791	0.825	0.840	0.855
30.0	0.791	0.876	0.913	0.930	0.946
40.0	0.825	0.913	0.952	0.969	0.986
50.0	0.840	0.930	0.969	0.987	1.005
60.0	0.855	0.946	0.986	1.005	1.002

Tabla A. 16. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 15 MeV usando un aplicador de $6 \times 6 \text{ cm}^2$ y normalizados respecto al campo de $15 \times 15 \text{ cm}^2$ y el aplicador de $15 \times 15 \text{ cm}^2$

	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20.0	0.672	0.756	0.803	0.824	0.829	0.830	0.831	0.831	0.831
30.0	0.756	0.850	0.904	0.927	0.933	0.933	0.935	0.935	0.935
40.0	0.803	0.904	0.961	0.985	0.991	0.992	0.994	0.993	0.993
50.0	0.824	0.927	0.985	1.011	1.017	1.018	1.019	1.019	1.019
60.0	0.829	0.933	0.991	1.017	1.023	1.024	1.026	1.025	1.025
70.0	0.830	0.933	0.992	1.018	1.024	1.025	1.026	1.026	1.026
80.0	0.831	0.935	0.994	1.019	1.026	1.026	1.028	1.028	1.028
90.0	0.831	0.935	0.993	1.019	1.025	1.026	1.028	1.028	1.027
100.0	0.830	0.935	0.993	1.019	1.025	1.026	1.028	1.027	1.027

Tabla A. 17. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 15 MeV usando un aplicador de $10 \times 10 \text{ cm}^2$ y normalizados respecto al campo de $15 \times 15 \text{ cm}^2$ y el aplicador de $15 \times 15 \text{ cm}^2$

	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0	110.0	120.0	130.0	140.0	150.0
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20.0	0.680	0.767	0.802	0.822	0.827	0.831	0.833	0.833	0.832	0.830	0.827	0.826	0.825	0.825
30.0	0.767	0.864	0.904	0.927	0.932	0.938	0.939	0.939	0.938	0.936	0.933	0.932	0.931	0.930
40.0	0.802	0.904	0.946	0.969	0.975	0.980	0.983	0.982	0.981	0.978	0.976	0.975	0.973	0.972
50.0	0.822	0.927	0.969	0.993	0.999	1.005	1.007	1.006	1.006	1.003	1.000	0.999	0.998	0.997
60.0	0.827	0.932	0.975	0.999	1.006	1.011	1.013	1.013	1.012	1.009	1.006	1.005	1.004	1.003
70.0	0.831	0.938	0.980	1.005	1.011	1.017	1.019	1.018	1.018	1.015	1.012	1.011	1.009	1.008
80.0	0.833	0.939	0.983	1.007	1.013	1.019	1.021	1.020	1.020	1.017	1.014	1.013	1.012	1.010
90.0	0.833	0.939	0.982	1.006	1.013	1.018	1.020	1.020	1.019	1.016	1.013	1.012	1.011	1.010
100.0	0.832	0.938	0.981	1.006	1.012	1.018	1.020	1.019	1.018	1.015	1.013	1.011	1.010	1.009
110.0	0.830	0.936	0.978	1.003	1.009	1.015	1.017	1.016	1.015	1.013	1.010	1.008	1.007	1.006
120.0	0.827	0.933	0.976	1.000	1.006	1.012	1.014	1.013	1.013	1.010	1.007	1.006	1.004	1.003
130.0	0.826	0.932	0.975	0.999	1.005	1.011	1.013	1.012	1.011	1.008	1.006	1.004	1.003	1.002
140.0	0.825	0.931	0.973	0.998	1.004	1.009	1.012	1.011	1.010	1.007	1.004	1.003	1.002	1.001
150.0	0.825	0.930	0.972	0.997	1.003	1.008	1.010	1.010	1.009	1.006	1.003	1.002	1.001	1.000

Tabla A. 18. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 15 MeV usando un aplicador de $15 \times 15 \text{ cm}^2$ y normalizados respecto al campo de $15 \times 15 \text{ cm}^2$ y el aplicador de $15 \times 15 \text{ cm}^2$

	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0	110.0	120.0	130.0	140.0	150.0
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20.0	0.669	0.743	0.787	0.804	0.811	0.817	0.817	0.816	0.815	0.815	0.815	0.814	0.813	0.813
30.0	0.743	0.825	0.874	0.893	0.901	0.908	0.907	0.906	0.906	0.905	0.905	0.904	0.903	0.902
40.0	0.787	0.874	0.927	0.946	0.955	0.962	0.961	0.961	0.960	0.960	0.959	0.958	0.957	0.956
50.0	0.804	0.893	0.946	0.967	0.975	0.983	0.982	0.981	0.980	0.980	0.980	0.979	0.978	0.977
60.0	0.811	0.901	0.955	0.975	0.984	0.992	0.991	0.990	0.989	0.989	0.989	0.988	0.987	0.986
70.0	0.817	0.908	0.962	0.983	0.992	0.999	0.998	0.997	0.997	0.996	0.996	0.995	0.994	0.993
80.0	0.817	0.907	0.961	0.982	0.991	0.998	0.998	0.997	0.996	0.996	0.995	0.994	0.993	0.993
90.0	0.816	0.906	0.961	0.981	0.990	0.997	0.997	0.996	0.995	0.995	0.994	0.994	0.993	0.992
100.0	0.815	0.906	0.960	0.980	0.989	0.997	0.996	0.995	0.994	0.994	0.994	0.993	0.992	0.991
110.0	0.815	0.905	0.960	0.980	0.989	0.996	0.996	0.995	0.994	0.994	0.993	0.992	0.991	0.990
120.0	0.815	0.905	0.959	0.980	0.989	0.996	0.995	0.994	0.994	0.993	0.993	0.992	0.991	0.990
130.0	0.814	0.904	0.958	0.979	0.988	0.995	0.994	0.994	0.993	0.992	0.992	0.991	0.990	0.989
140.0	0.813	0.903	0.957	0.978	0.987	0.994	0.993	0.993	0.992	0.991	0.991	0.990	0.989	0.988
150.0	0.813	0.902	0.956	0.977	0.986	0.993	0.993	0.992	0.991	0.990	0.990	0.989	0.988	0.987
160.0	0.812	0.901	0.955	0.976	0.985	0.992	0.991	0.991	0.990	0.989	0.989	0.988	0.987	0.986
170.0	0.811	0.900	0.954	0.975	0.984	0.991	0.990	0.990	0.989	0.988	0.988	0.987	0.986	0.985
180.0	0.810	0.900	0.953	0.974	0.983	0.990	0.989	0.988	0.988	0.987	0.987	0.986	0.985	0.984
190.0	0.809	0.899	0.952	0.973	0.982	0.989	0.988	0.987	0.987	0.986	0.986	0.985	0.984	0.983
200.0	0.808	0.898	0.951	0.972	0.980	0.988	0.987	0.986	0.985	0.985	0.985	0.984	0.983	0.982

	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20.0	0.812	0.811	0.810	0.809	0.808
30.0	0.901	0.900	0.900	0.899	0.898
40.0	0.955	0.954	0.953	0.952	0.951
50.0	0.976	0.975	0.974	0.973	0.972
60.0	0.985	0.984	0.983	0.982	0.980
70.0	0.992	0.991	0.990	0.989	0.988
80.0	0.991	0.990	0.989	0.988	0.987
90.0	0.991	0.990	0.988	0.987	0.986
100.0	0.990	0.989	0.988	0.987	0.985
110.0	0.989	0.988	0.987	0.986	0.985
120.0	0.989	0.988	0.987	0.986	0.985
130.0	0.988	0.987	0.986	0.985	0.984
140.0	0.987	0.986	0.985	0.984	0.983
150.0	0.986	0.985	0.984	0.983	0.982
160.0	0.985	0.984	0.983	0.982	0.981
170.0	0.984	0.983	0.982	0.981	0.980
180.0	0.983	0.982	0.981	0.980	0.979
190.0	0.982	0.981	0.980	0.979	0.978
200.0	0.981	0.980	0.979	0.978	0.977

Tabla A. 19. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 15MeV usando un aplicador de 20x20 cm² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm² y el aplicador de 15x15 cm²

	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0	110.0	120.0	130.0	140.0	150.0
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20.0	0.728	0.794	0.823	0.836	0.838	0.844	0.844	0.844	0.843	0.842	0.842	0.841	0.840	0.840
30.0	0.794	0.865	0.897	0.912	0.914	0.920	0.921	0.920	0.919	0.919	0.918	0.917	0.917	0.916
40.0	0.823	0.897	0.930	0.946	0.948	0.954	0.955	0.954	0.953	0.953	0.952	0.951	0.950	0.950
50.0	0.836	0.912	0.946	0.962	0.964	0.970	0.970	0.970	0.969	0.968	0.968	0.967	0.966	0.965
60.0	0.838	0.914	0.948	0.964	0.966	0.973	0.973	0.972	0.971	0.971	0.970	0.969	0.968	0.967
70.0	0.844	0.920	0.954	0.970	0.973	0.979	0.979	0.978	0.978	0.977	0.976	0.976	0.975	0.974
80.0	0.844	0.921	0.955	0.970	0.973	0.979	0.979	0.979	0.978	0.977	0.977	0.976	0.975	0.974
90.0	0.844	0.920	0.954	0.970	0.972	0.978	0.979	0.978	0.977	0.977	0.976	0.975	0.974	0.973
100.0	0.843	0.919	0.953	0.969	0.971	0.978	0.978	0.977	0.977	0.976	0.975	0.974	0.974	0.973
110.0	0.842	0.919	0.953	0.968	0.971	0.977	0.977	0.977	0.976	0.975	0.975	0.974	0.973	0.972
120.0	0.842	0.918	0.952	0.968	0.970	0.976	0.977	0.976	0.975	0.975	0.974	0.973	0.972	0.971
130.0	0.841	0.917	0.951	0.967	0.969	0.976	0.976	0.975	0.974	0.974	0.973	0.972	0.971	0.971
140.0	0.840	0.917	0.950	0.966	0.968	0.975	0.975	0.974	0.974	0.973	0.972	0.971	0.971	0.970
150.0	0.840	0.916	0.950	0.965	0.967	0.974	0.974	0.973	0.973	0.972	0.971	0.971	0.970	0.969
160.0	0.839	0.915	0.949	0.964	0.967	0.973	0.973	0.972	0.972	0.971	0.970	0.970	0.969	0.968
170.0	0.838	0.914	0.948	0.963	0.966	0.972	0.972	0.972	0.971	0.970	0.969	0.969	0.968	0.967
180.0	0.837	0.913	0.947	0.962	0.965	0.971	0.971	0.971	0.970	0.969	0.969	0.968	0.967	0.966
190.0	0.836	0.912	0.946	0.961	0.964	0.970	0.970	0.970	0.969	0.968	0.968	0.967	0.966	0.965
200.0	0.836	0.911	0.945	0.961	0.963	0.969	0.969	0.969	0.968	0.967	0.967	0.966	0.965	0.964
210.0	0.835	0.911	0.944	0.960	0.962	0.969	0.969	0.968	0.968	0.967	0.966	0.965	0.965	0.964
220.0	0.835	0.910	0.944	0.960	0.962	0.968	0.969	0.968	0.967	0.967	0.966	0.965	0.964	0.963
230.0	0.834	0.910	0.944	0.959	0.962	0.968	0.968	0.967	0.967	0.966	0.965	0.965	0.964	0.963
240.0	0.834	0.910	0.943	0.959	0.961	0.968	0.968	0.967	0.966	0.966	0.965	0.964	0.963	0.963
250.0	0.834	0.909	0.943	0.959	0.961	0.967	0.967	0.967	0.966	0.965	0.965	0.964	0.963	0.962

	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	210.0	220.0	230.0	240.0	250.0
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20.0	0.839	0.838	0.837	0.836	0.836	0.835	0.835	0.834	0.834	0.834
30.0	0.915	0.914	0.913	0.912	0.911	0.911	0.910	0.910	0.910	0.909
40.0	0.949	0.948	0.947	0.946	0.945	0.944	0.944	0.944	0.943	0.943
50.0	0.964	0.963	0.962	0.961	0.961	0.960	0.960	0.959	0.959	0.959
60.0	0.967	0.966	0.965	0.964	0.963	0.962	0.962	0.962	0.961	0.961
70.0	0.973	0.972	0.971	0.970	0.969	0.969	0.968	0.968	0.968	0.967
80.0	0.973	0.972	0.971	0.970	0.969	0.969	0.969	0.968	0.968	0.967
90.0	0.972	0.972	0.971	0.970	0.969	0.968	0.968	0.967	0.967	0.967
100.0	0.972	0.971	0.970	0.969	0.968	0.968	0.967	0.967	0.966	0.966
110.0	0.971	0.970	0.969	0.968	0.967	0.967	0.967	0.966	0.966	0.965
120.0	0.970	0.969	0.969	0.968	0.967	0.966	0.966	0.965	0.965	0.965
130.0	0.970	0.969	0.968	0.967	0.966	0.965	0.965	0.965	0.964	0.964
140.0	0.969	0.968	0.967	0.966	0.965	0.965	0.964	0.964	0.963	0.963
150.0	0.968	0.967	0.966	0.965	0.964	0.964	0.963	0.963	0.963	0.962
160.0	0.967	0.966	0.965	0.964	0.963	0.963	0.962	0.962	0.962	0.961
170.0	0.966	0.965	0.964	0.963	0.962	0.962	0.961	0.961	0.961	0.960
180.0	0.965	0.964	0.963	0.962	0.961	0.961	0.960	0.960	0.960	0.959
190.0	0.964	0.963	0.962	0.961	0.960	0.960	0.960	0.959	0.959	0.958
200.0	0.963	0.962	0.961	0.960	0.959	0.959	0.959	0.958	0.958	0.957
210.0	0.963	0.962	0.961	0.960	0.959	0.959	0.958	0.958	0.957	0.957
220.0	0.962	0.961	0.960	0.960	0.959	0.958	0.958	0.957	0.957	0.957
230.0	0.962	0.961	0.960	0.959	0.958	0.958	0.957	0.957	0.957	0.956
240.0	0.962	0.961	0.960	0.959	0.958	0.957	0.957	0.957	0.956	0.956
250.0	0.961	0.960	0.959	0.958	0.957	0.957	0.957	0.956	0.956	0.956

Tabla A. 20. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 15 MeV usando un aplicador de 25x25 cm² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm² y el aplicador de 15x15 cm²

Los resultados de los Factores de Salida medidos para un haz de electrones de 18 MeV para los distintos aplicadores disponibles fueron los siguientes:

	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20.0	0.725	0.808	0.844	0.853	0.878
30.0	0.808	0.900	0.941	0.950	0.978
40.0	0.844	0.941	0.983	0.993	1.022
50.0	0.853	0.950	0.993	1.003	1.033
60.0	0.878	0.978	1.022	1.033	1.063

Tabla A. 21. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 18 MeV usando un aplicador de $6 \times 6 \text{ cm}^2$ y normalizados respecto al campo de $15 \times 15 \text{ cm}^2$ y el aplicador de $15 \times 15 \text{ cm}^2$

	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20.0	0.719	0.802	0.839	0.863	0.863	0.868	0.869	0.870	0.870
30.0	0.802	0.893	0.934	0.962	0.962	0.968	0.969	0.969	0.970
40.0	0.839	0.934	0.977	1.006	1.006	1.012	1.013	1.014	1.014
50.0	0.863	0.962	1.006	1.036	1.036	1.042	1.043	1.044	1.044
60.0	0.863	0.962	1.006	1.036	1.036	1.042	1.043	1.044	1.044
70.0	0.868	0.968	1.012	1.042	1.042	1.049	1.050	1.050	1.050
80.0	0.869	0.969	1.013	1.043	1.043	1.050	1.051	1.051	1.051
90.0	0.870	0.969	1.014	1.044	1.044	1.050	1.051	1.051	1.052
100.0	0.870	0.970	1.014	1.044	1.044	1.050	1.051	1.052	1.052

Tabla A. 22. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 18 MeV usando un aplicador de $10 \times 10 \text{ cm}^2$ y normalizados respecto al campo de $15 \times 15 \text{ cm}^2$ y el aplicador de $15 \times 15 \text{ cm}^2$

	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0	110.0	120.0	130.0	140.0	150.0
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20.0	0.683	0.777	0.803	0.820	0.836	0.830	0.843	0.842	0.840	0.840	0.839	0.835	0.831	0.827
30.0	0.777	0.884	0.914	0.932	0.951	0.944	0.959	0.957	0.956	0.955	0.954	0.949	0.945	0.940
40.0	0.803	0.914	0.944	0.964	0.983	0.976	0.991	0.989	0.988	0.987	0.986	0.981	0.977	0.972
50.0	0.822	0.935	0.966	0.986	1.006	0.998	1.014	1.013	1.011	1.010	1.009	1.004	0.999	0.994
60.0	0.836	0.951	0.983	1.003	1.023	1.015	1.031	1.030	1.028	1.027	1.026	1.021	1.016	1.011
70.0	0.830	0.944	0.976	0.996	1.015	1.008	1.024	1.022	1.021	1.020	1.019	1.014	1.009	1.004
80.0	0.843	0.959	0.991	1.011	1.031	1.024	1.039	1.038	1.036	1.036	1.035	1.030	1.025	1.020
90.0	0.842	0.957	0.989	1.009	1.030	1.022	1.038	1.036	1.035	1.034	1.033	1.028	1.023	1.018
100.0	0.840	0.956	0.988	1.008	1.028	1.021	1.036	1.035	1.034	1.033	1.032	1.027	1.022	1.017
110.0	0.840	0.955	0.987	1.007	1.027	1.020	1.036	1.034	1.033	1.032	1.031	1.026	1.021	1.016
120.0	0.839	0.954	0.986	1.006	1.026	1.019	1.035	1.033	1.032	1.031	1.030	1.025	1.020	1.015
130.0	0.835	0.949	0.981	1.001	1.021	1.014	1.030	1.028	1.027	1.026	1.025	1.020	1.015	1.010
140.0	0.831	0.945	0.977	0.996	1.016	1.009	1.025	1.023	1.022	1.021	1.020	1.015	1.010	1.005
150.0	0.827	0.940	0.972	0.994	1.011	1.004	1.020	1.018	1.017	1.016	1.015	1.010	1.005	1.000

Tabla A. 23. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 18 MeV usando un aplicador de $15 \times 15 \text{ cm}^2$ y normalizados respecto al campo de $15 \times 15 \text{ cm}^2$ y el aplicador de $15 \times 15 \text{ cm}^2$

	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0	110.0	120.0	130.0	140.0	150.0
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20.0	0.673	0.756	0.801	0.812	0.825	0.826	0.830	0.830	0.829	0.826	0.823	0.823	0.824	0.824
30.0	0.756	0.849	0.900	0.911	0.926	0.928	0.932	0.931	0.931	0.927	0.924	0.924	0.925	0.925
40.0	0.801	0.900	0.954	0.966	0.981	0.984	0.988	0.987	0.987	0.983	0.980	0.980	0.980	0.980
50.0	0.812	0.911	0.966	0.978	0.994	0.996	1.001	1.000	0.999	0.996	0.992	0.992	0.993	0.993
60.0	0.825	0.926	0.981	0.994	1.010	1.012	1.017	1.016	1.015	1.012	1.008	1.008	1.009	1.009
70.0	0.826	0.928	0.984	0.996	1.012	1.015	1.019	1.018	1.018	1.014	1.010	1.011	1.011	1.011
80.0	0.830	0.923	0.988	1.001	1.017	1.019	1.024	1.023	1.022	1.019	1.015	1.015	1.016	1.016
90.0	0.830	0.927	0.987	1.000	1.016	1.018	1.023	1.022	1.022	1.018	1.014	1.015	1.015	1.015
100.0	0.829	0.931	0.987	0.999	1.015	1.018	1.022	1.022	1.021	1.017	1.014	1.014	1.014	1.015
110.0	0.826	0.927	0.983	0.996	1.012	1.014	1.019	1.018	1.017	1.014	1.010	1.010	1.011	1.011
120.0	0.823	0.924	0.980	0.992	1.008	1.010	1.015	1.014	1.014	1.010	1.006	1.007	1.007	1.007
130.0	0.823	0.924	0.980	0.992	1.008	1.011	1.015	1.015	1.014	1.010	1.007	1.007	1.007	1.008
140.0	0.824	0.925	0.980	0.993	1.009	1.011	1.016	1.015	1.014	1.011	1.007	1.007	1.008	1.008
150.0	0.824	0.925	0.980	0.993	1.009	1.011	1.016	1.015	1.015	1.011	1.007	1.008	1.008	1.008
160.0	0.821	0.922	0.978	0.990	1.006	1.008	1.013	1.012	1.011	1.008	1.004	1.004	1.005	1.005
170.0	0.819	0.919	0.975	0.987	1.003	1.005	1.010	1.009	1.008	1.005	1.001	1.001	1.002	1.002
180.0	0.816	0.917	0.972	0.984	1.000	1.002	1.007	1.006	1.005	1.002	0.998	0.998	0.999	0.999
190.0	0.814	0.914	0.969	0.981	0.997	0.999	1.004	1.003	1.002	0.999	0.995	0.995	0.996	0.996
200.0	0.812	0.911	0.966	0.978	0.994	0.996	1.001	1.000	0.999	0.996	0.992	0.992	0.993	0.993

	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20.0	0.821	0.819	0.816	0.814	0.812
30.0	0.922	0.919	0.917	0.914	0.911
40.0	0.978	0.975	0.972	0.969	0.966
50.0	0.990	0.987	0.984	0.981	0.978
60.0	1.006	1.003	1.000	0.997	0.994
70.0	1.008	1.005	1.002	0.999	0.996
80.0	1.013	1.010	1.007	1.004	1.001
90.0	1.012	1.009	1.006	1.003	1.000
100.0	1.011	1.008	1.005	1.002	0.999
110.0	1.008	1.005	1.002	0.999	0.996
120.0	1.004	1.001	0.998	0.995	0.992
130.0	1.004	1.001	0.998	0.995	0.992
140.0	1.005	1.002	0.999	0.996	0.993
150.0	1.005	1.002	0.999	0.996	0.993
160.0	1.002	0.999	0.996	0.993	0.990
170.0	0.999	0.996	0.993	0.990	0.987
180.0	0.996	0.993	0.990	0.987	0.984
190.0	0.993	0.990	0.987	0.984	0.981
200.0	0.990	0.987	0.984	0.981	0.978

Tabla A. 24. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 18MeV usando un aplicador de 20x20 cm² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm² y el aplicador de 15x15 cm²

	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0	110.0	120.0	130.0	140.0	150.0
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20.0	0.701	0.777	0.814	0.829	0.827	0.831	0.838	0.837	0.836	0.836	0.837	0.836	0.835	0.834
30.0	0.777	0.861	0.902	0.919	0.916	0.921	0.928	0.927	0.926	0.927	0.928	0.927	0.925	0.924
40.0	0.814	0.902	0.946	0.963	0.960	0.965	0.973	0.971	0.970	0.971	0.972	0.971	0.970	0.968
50.0	0.829	0.919	0.963	0.981	0.978	0.983	0.991	0.989	0.988	0.989	0.990	0.989	0.988	0.986
60.0	0.827	0.916	0.960	0.978	0.975	0.980	0.988	0.987	0.985	0.986	0.987	0.986	0.985	0.984
70.0	0.831	0.921	0.965	0.983	0.980	0.985	0.993	0.992	0.990	0.991	0.992	0.991	0.990	0.989
80.0	0.838	0.928	0.973	0.991	0.988	0.993	1.001	0.999	0.998	0.999	1.000	0.999	0.997	0.996
90.0	0.837	0.927	0.971	0.989	0.987	0.992	0.999	0.998	0.997	0.998	0.998	0.997	0.996	0.995
100.0	0.836	0.926	0.970	0.988	0.985	0.990	0.998	0.997	0.995	0.996	0.997	0.996	0.995	0.994
110.0	0.836	0.927	0.971	0.989	0.986	0.991	0.999	0.998	0.996	0.997	0.998	0.997	0.996	0.994
120.0	0.837	0.928	0.972	0.990	0.987	0.992	1.000	0.998	0.997	0.998	0.999	0.998	0.996	0.995
130.0	0.836	0.927	0.971	0.989	0.986	0.991	0.999	0.997	0.996	0.997	0.998	0.996	0.995	0.994
140.0	0.835	0.925	0.970	0.988	0.985	0.990	0.997	0.996	0.995	0.996	0.996	0.995	0.994	0.993
150.0	0.834	0.924	0.968	0.986	0.984	0.989	0.996	0.995	0.994	0.994	0.995	0.994	0.993	0.992
160.0	0.833	0.923	0.967	0.985	0.982	0.988	0.995	0.994	0.993	0.993	0.994	0.993	0.992	0.991
170.0	0.832	0.922	0.966	0.984	0.981	0.987	0.994	0.993	0.992	0.992	0.993	0.992	0.991	0.990
180.0	0.831	0.921	0.965	0.983	0.980	0.986	0.993	0.992	0.990	0.991	0.992	0.991	0.990	0.989
190.0	0.830	0.920	0.964	0.982	0.979	0.984	0.992	0.991	0.989	0.990	0.991	0.990	0.989	0.988
200.0	0.830	0.919	0.963	0.981	0.978	0.983	0.991	0.990	0.988	0.989	0.990	0.989	0.988	0.987
210.0	0.829	0.918	0.962	0.980	0.977	0.982	0.990	0.989	0.987	0.988	0.989	0.988	0.987	0.985
220.0	0.828	0.917	0.961	0.979	0.976	0.981	0.989	0.987	0.986	0.987	0.988	0.987	0.985	0.984
230.0	0.827	0.916	0.960	0.978	0.975	0.980	0.987	0.986	0.985	0.986	0.987	0.985	0.984	0.983
240.0	0.826	0.915	0.959	0.976	0.974	0.979	0.986	0.985	0.984	0.985	0.985	0.984	0.983	0.982
250.0	0.825	0.914	0.958	0.975	0.972	0.978	0.985	0.984	0.983	0.983	0.984	0.983	0.982	0.981

	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	210.0	220.0	230.0	240.0	250.0
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20.0	0.833	0.832	0.831	0.830	0.830	0.829	0.828	0.827	0.826	0.825
30.0	0.923	0.922	0.921	0.920	0.919	0.918	0.917	0.916	0.915	0.914
40.0	0.967	0.966	0.965	0.964	0.963	0.962	0.961	0.960	0.959	0.958
50.0	0.985	0.984	0.983	0.982	0.981	0.980	0.979	0.978	0.976	0.975
60.0	0.982	0.981	0.980	0.979	0.978	0.977	0.976	0.975	0.974	0.972
70.0	0.988	0.987	0.986	0.984	0.983	0.982	0.981	0.980	0.979	0.978
80.0	0.995	0.994	0.993	0.992	0.991	0.990	0.989	0.987	0.986	0.985
90.0	0.994	0.993	0.992	0.991	0.990	0.989	0.987	0.986	0.985	0.984
100.0	0.993	0.992	0.990	0.989	0.988	0.987	0.986	0.985	0.984	0.983
110.0	0.993	0.992	0.991	0.990	0.989	0.988	0.987	0.986	0.985	0.983
120.0	0.994	0.993	0.992	0.991	0.990	0.989	0.988	0.987	0.985	0.984
130.0	0.993	0.992	0.991	0.990	0.989	0.988	0.987	0.985	0.984	0.983
140.0	0.992	0.991	0.990	0.989	0.988	0.987	0.985	0.984	0.983	0.982
150.0	0.991	0.990	0.989	0.988	0.987	0.985	0.984	0.983	0.982	0.981
160.0	0.990	0.989	0.988	0.987	0.986	0.984	0.983	0.982	0.981	0.980
170.0	0.989	0.988	0.987	0.986	0.985	0.983	0.982	0.981	0.980	0.979
180.0	0.988	0.987	0.986	0.985	0.983	0.982	0.981	0.980	0.979	0.978
190.0	0.987	0.986	0.985	0.983	0.982	0.981	0.980	0.979	0.978	0.977
200.0	0.986	0.985	0.983	0.982	0.981	0.980	0.979	0.978	0.977	0.976
210.0	0.984	0.983	0.982	0.981	0.980	0.979	0.978	0.977	0.976	0.974
220.0	0.983	0.982	0.981	0.980	0.979	0.978	0.977	0.976	0.974	0.973
230.0	0.982	0.981	0.980	0.979	0.978	0.977	0.976	0.974	0.973	0.972
240.0	0.981	0.980	0.979	0.978	0.977	0.976	0.974	0.973	0.972	0.971
250.0	0.980	0.979	0.978	0.977	0.976	0.974	0.973	0.972	0.971	0.970

Tabla A. 25. Valores de salida medidos (campos cuadrados), calculados (campos rectangulares) e interpolados por el SPT para un haz de electrones de 18 MeV usando un aplicador de 25x25 cm² y normalizados respecto al campo de 15x15 cm² y el aplicador de 15x15 cm²

APÉNDICE B: DISTANCIA FUENTE SUPERFICIE EFECTIVA (SSD_{EFF})

Para un haz de electrones de 4 MeV

Cono (cm ²)	SSD		
	100,6 cm	110,6 cm	120,6 cm
6	17,05	11,65	8,115
10	18,57	14,08	10,78
15	18,88	14,6	11,57
20	19,44	15,44	12,48
25	19,74	15,77	12,7

Tabla B. 1. Valores de carga medidos para todos los tamaños de cono y a diferentes SSD (100, 110 y 120 cm mas d_{max}) utilizando un haz de electrones de 4MeV

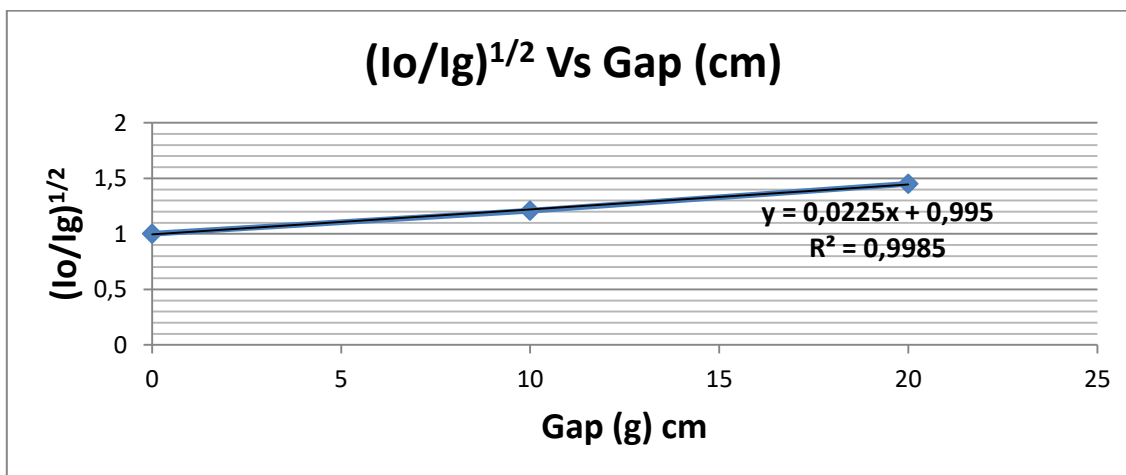


Figura B. 1. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 4MeV y un aplicador de 6x6 cm².

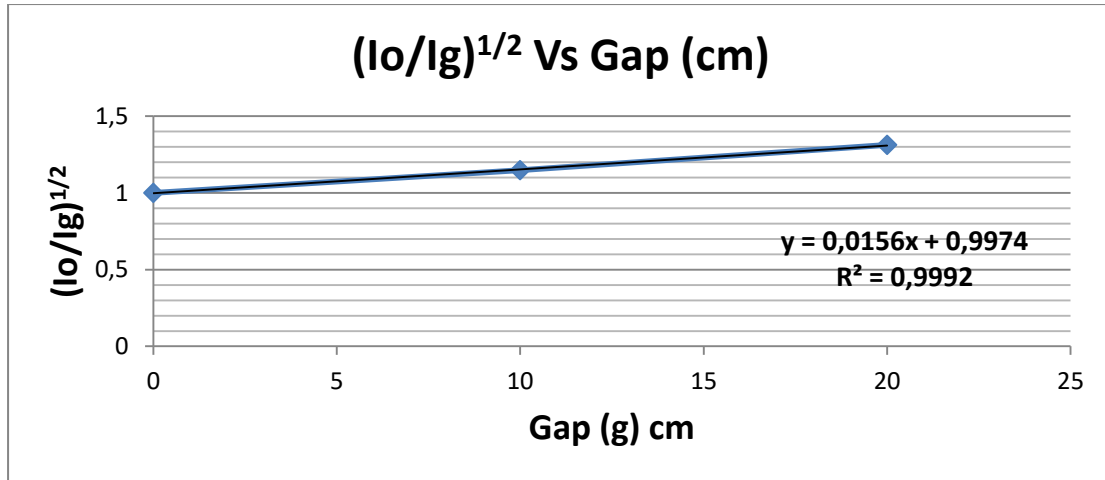


Figura B. 2. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 4MeV y un aplicador de 10x10 cm².

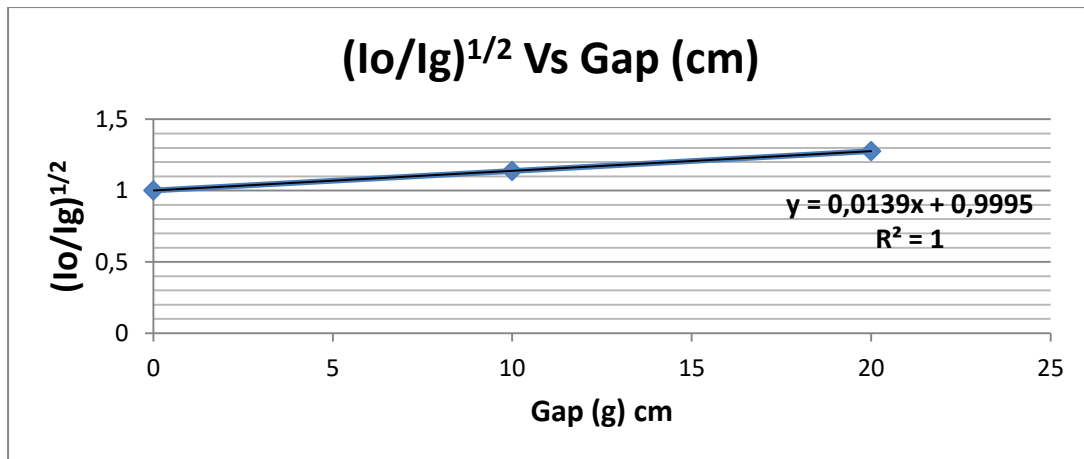


Figura B. 3. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 4 MeV y un aplicador de 15x15 cm²

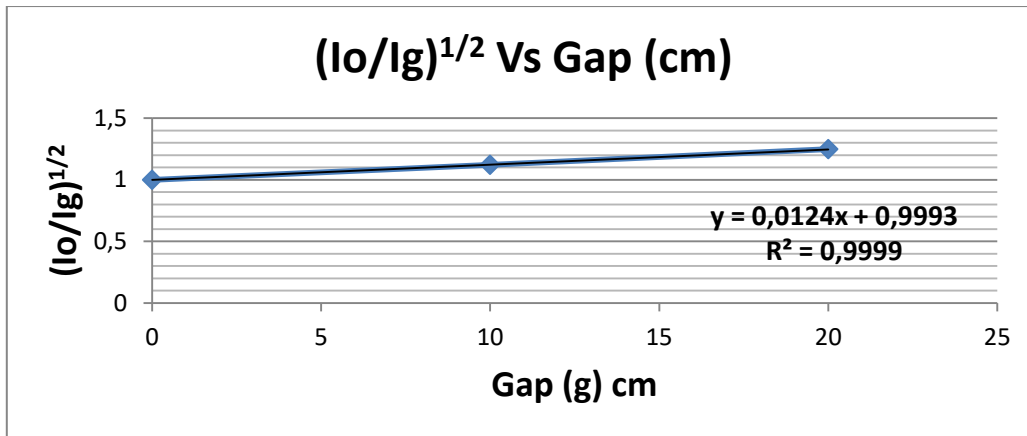


Figura B. 4. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 4 MeV y un aplicador de 20x20 cm².

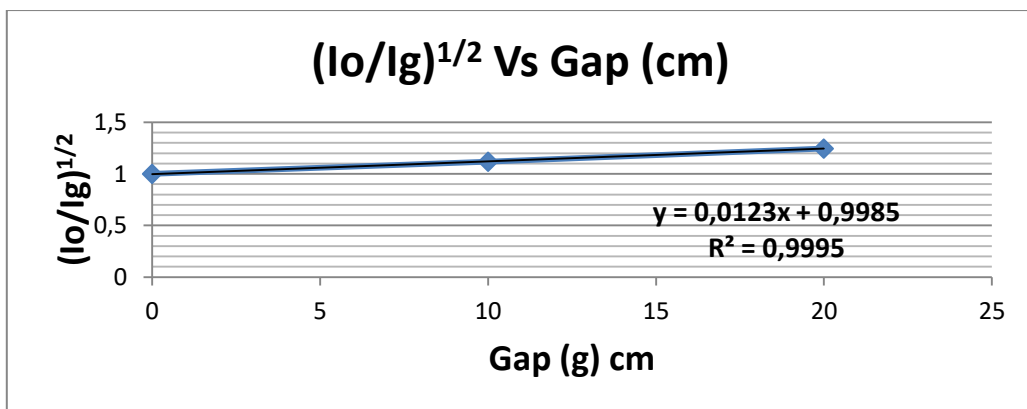


Figura B. 5. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 4 MeV y un aplicador de 25x25 cm².

Para un haz de electrones de 6MeV

Cono (cm²)	SSD		
	101,29 cm	111,29 cm	121,29 cm
6	18,95	14,27	11,03
10	19,15	15,26	12,4
15	19,05	15,39	12,62
20	19,21	15,64	12,9
25	19,1	15,57	12,87

Tabla B. 2. Valores de carga medidos para todos los tamaños de cono y a diferentes SSD (100, 110 y 120 cm mas d_{max}) utilizando un haz de electrones de 6 MeV

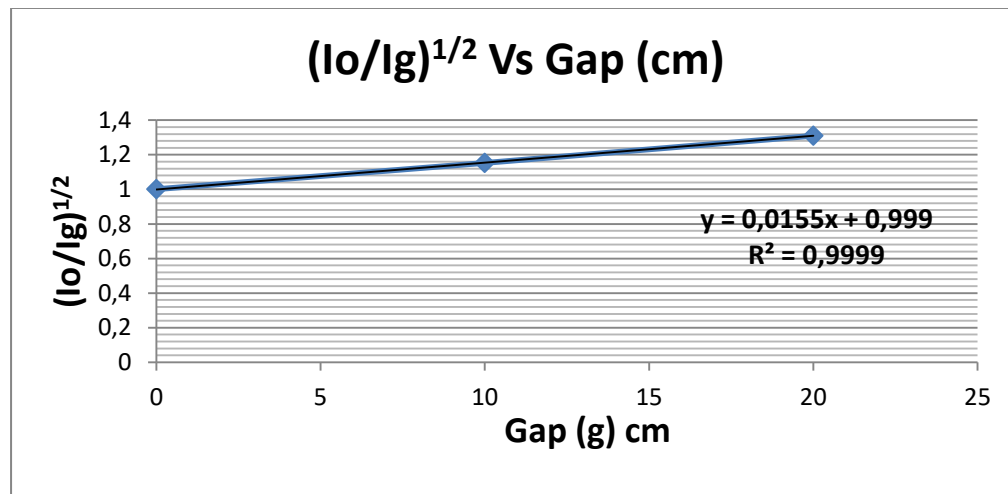


Figura B. 6. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 6MeV y un aplicador de 6x6 cm²

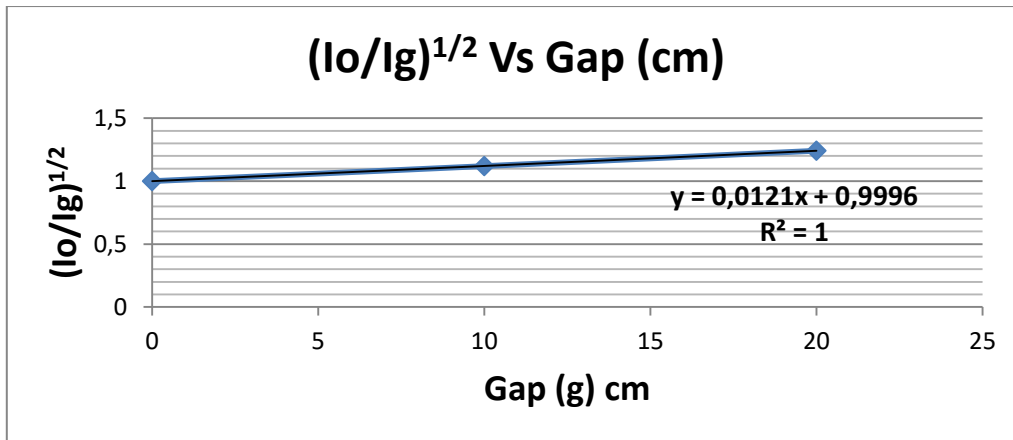


Figura B. 7. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 6 MeV y un aplicador de 10x10 cm²

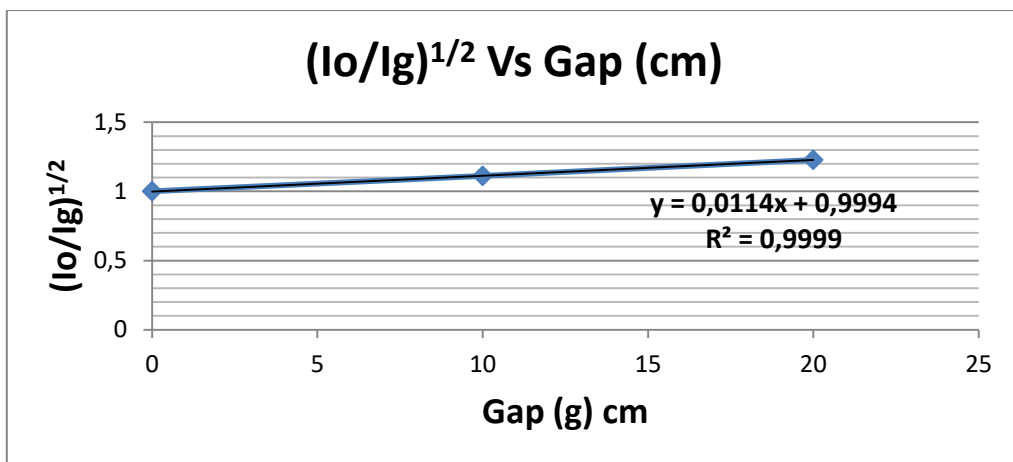


Figura B. 8. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 6 MeV y un aplicador de 15x15 cm²

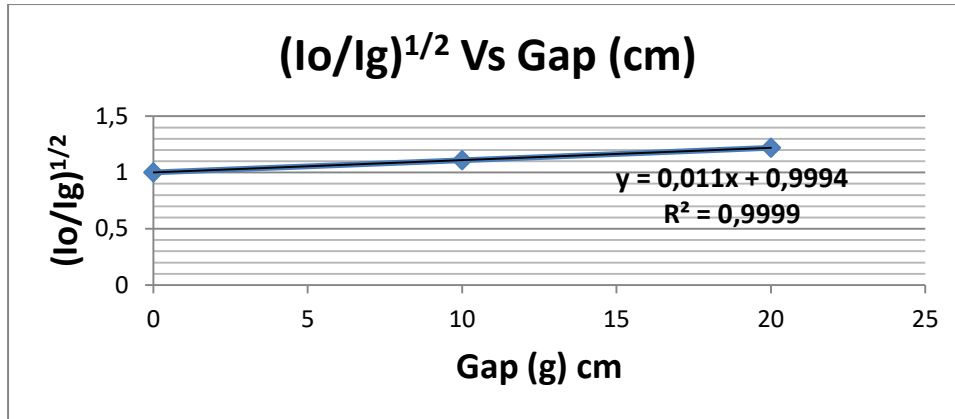


Figura B. 9. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 6 MeV y un aplicador de 20x20 cm²

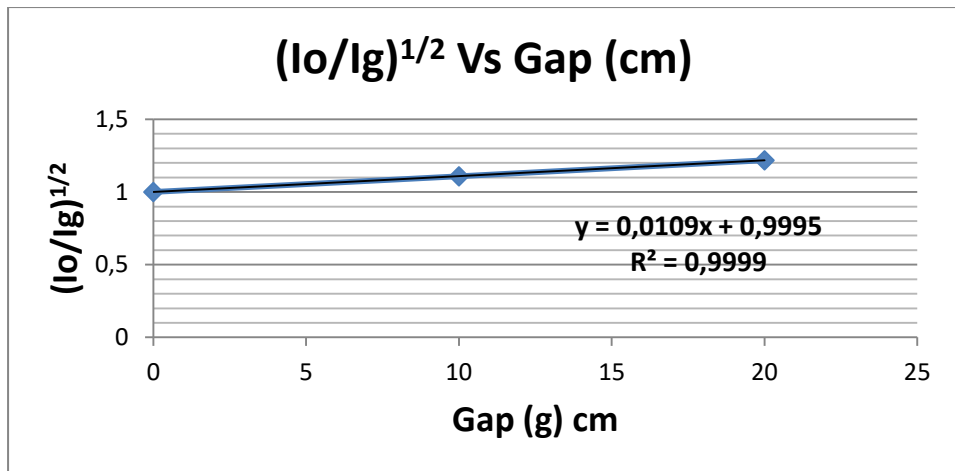


Figura B. 10. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 6 MeV y un aplicador de 25x25 cm²

Para un haz de electrones de 12MeV

Cono (cm ²)	SSD		
	102,63 cm	112,63 cm	122,63 cm
6	18,53	14,72	11,9
10	18,44	14,97	12,27
15	18,08	14,86	12,2
20	17,75	14,59	12,1
25	17,24	14,13	11,72

Tabla B. 3. Valores de carga medidos para todos los tamaños de cono y a diferentes SSD (100, 110 y 120 cm mas d_{max}) utilizando un haz de electrones de 12 MeV

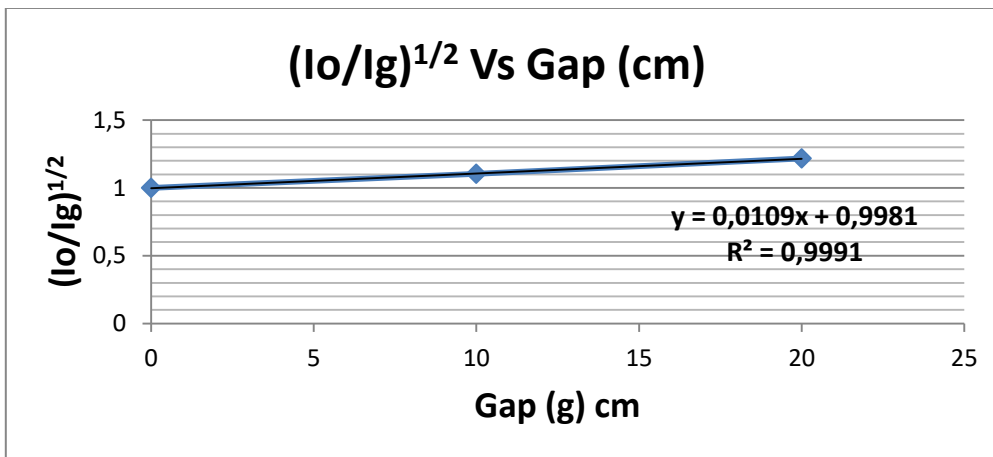


Figura B. 11. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 12MeV y un aplicador de 6x6 cm²

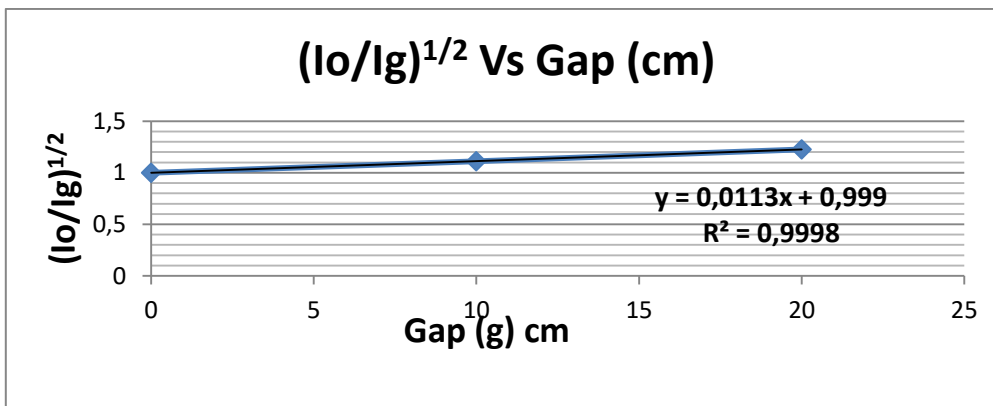


Figura B. 12. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 12 MeV y un aplicador de 10x10 cm²

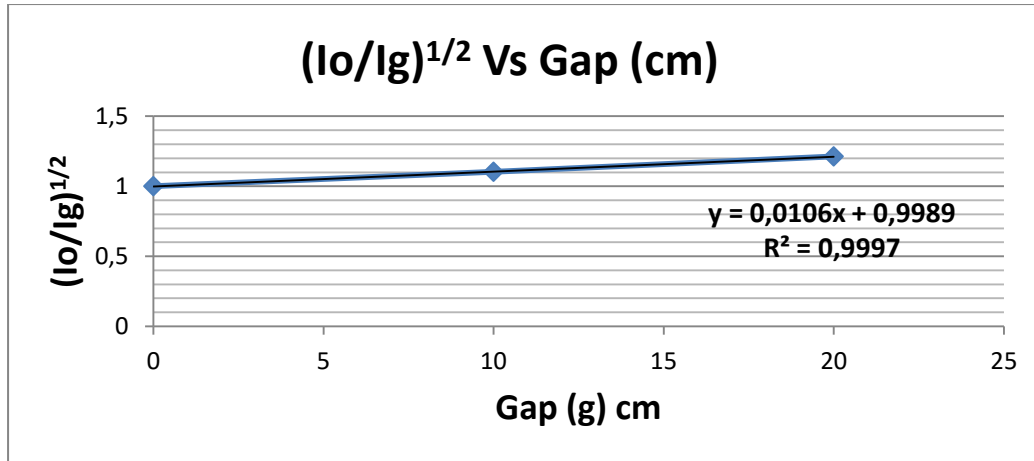


Figura B. 13. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 12 MeV y un aplicador de 15x15 cm²

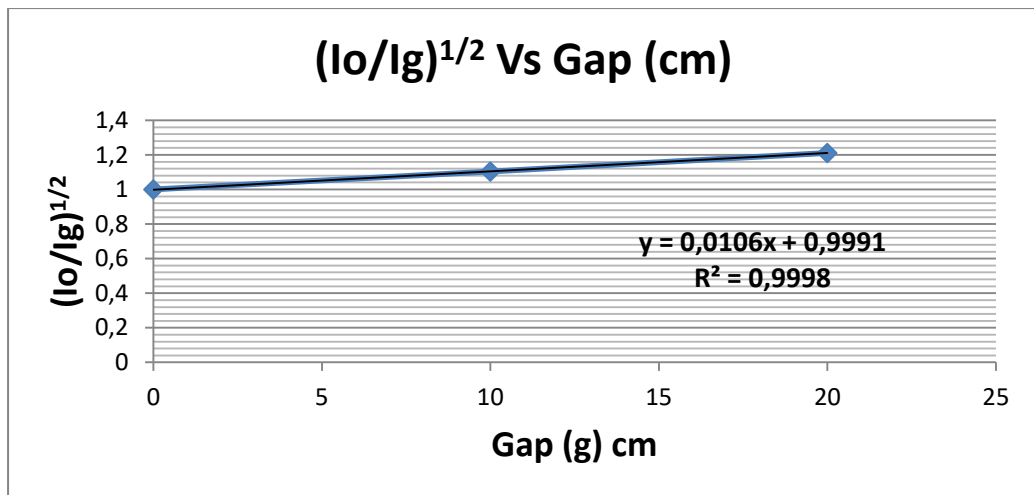


Figura B. 14. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 12 MeV y un aplicador de 20x20 cm²

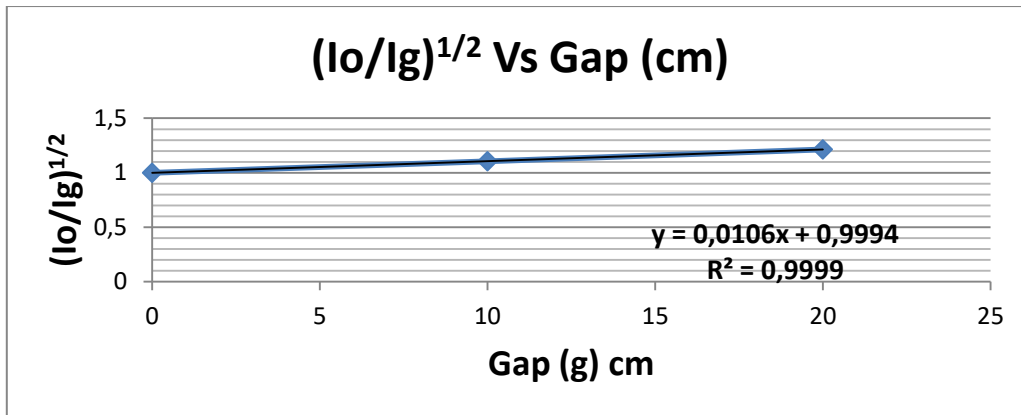


Figura B. 15. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 12 MeV y un aplicador de 25x25 cm²

Para un haz de electrones de 15MeV

Cono (cm ²)	SSD		
	103,55 cm	113,55 cm	123,55 cm
6	18,74	14,96	12,17
10	18,49	15,17	12,47
15	18,11	14,95	12,42
20	17,76	14,61	12,18
25	17,24	14,13	11,75

Tabla B. 4. Valores de carga medidos para todos los tamaños de cono y a diferentes SSD (100, 110 y 120 cm mas d_{max}) utilizando un haz de electrones de 15 MeV

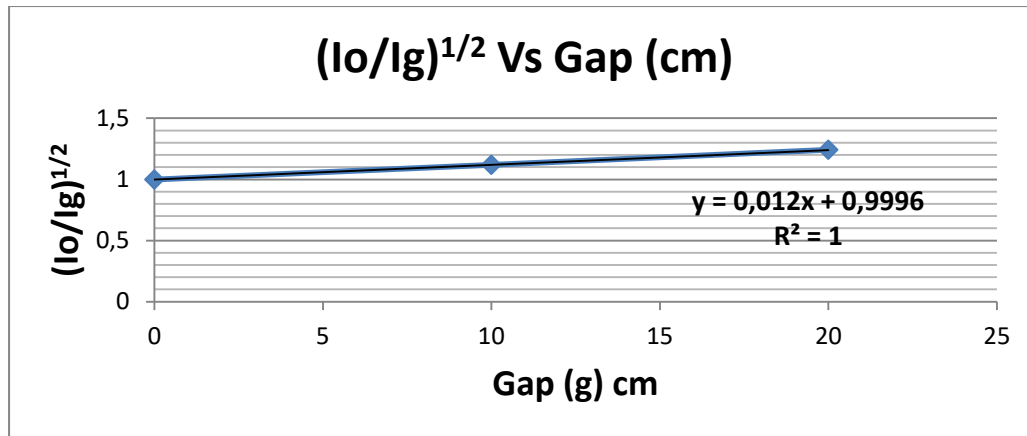


Figura B. 16. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 15MeV y un aplicador de 6x6 cm²

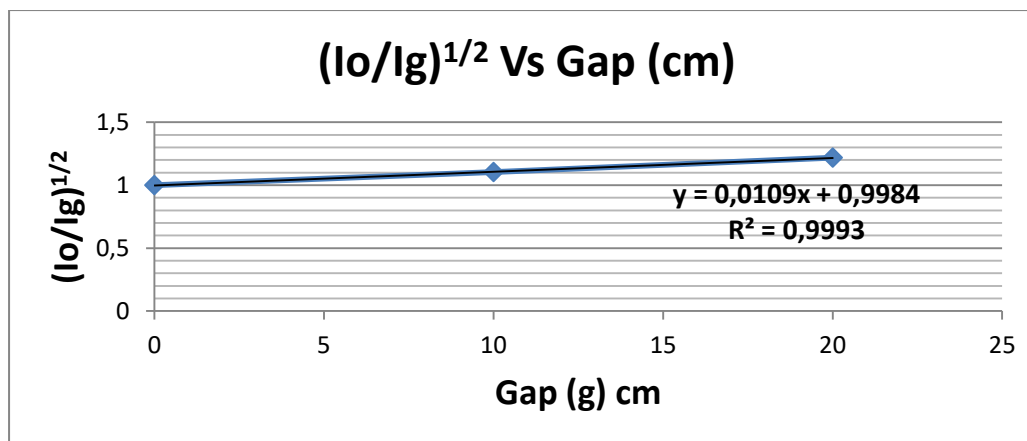


Figura B. 17. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 15 MeV y un aplicador de 10x10 cm²

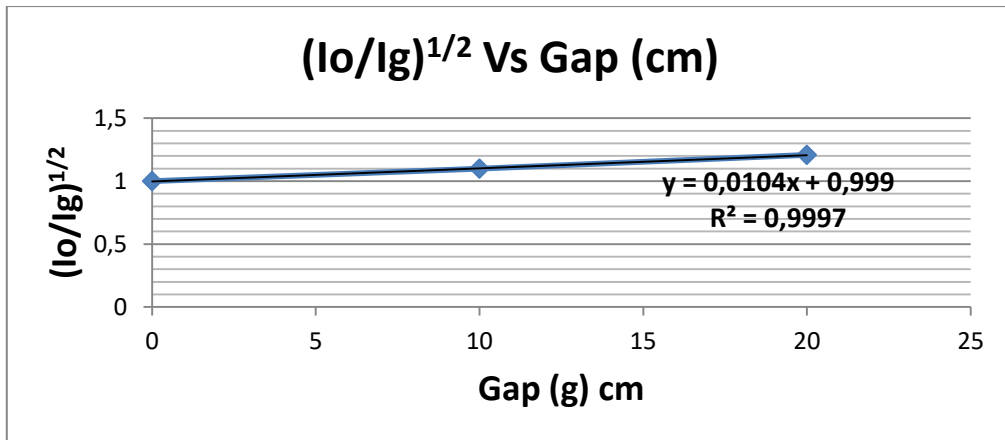


Figura B. 18. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 15 MeV y un aplicador de 15x15 cm²

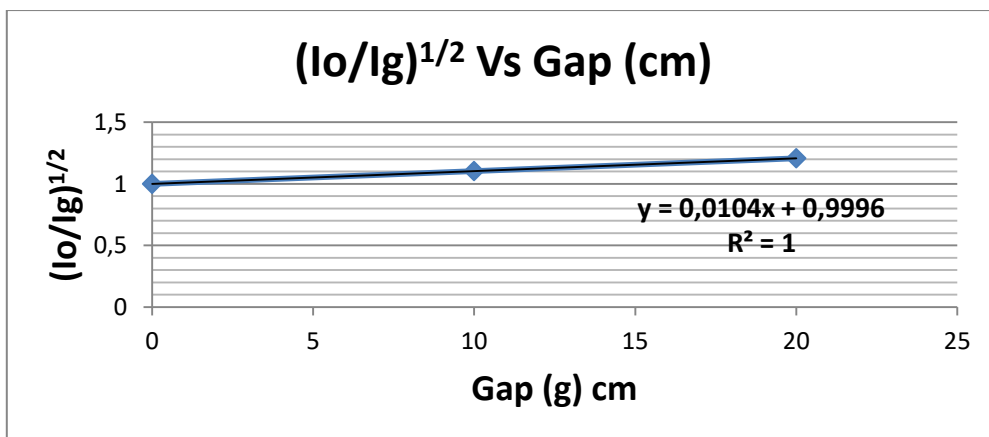


Figura B. 19. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 15 MeV y un aplicador de 20x20 cm²

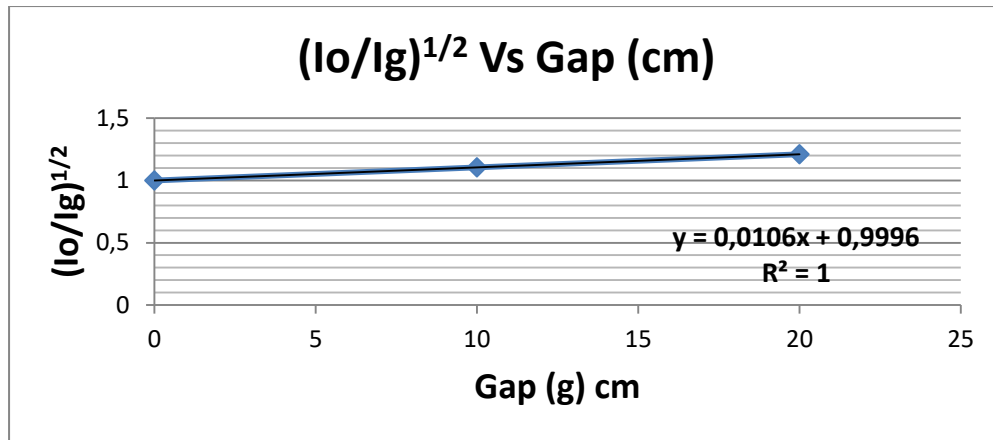


Figura B. 20. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 15 MeV y un aplicador de $25 \times 25 \text{ cm}^2$

Para un haz de electrones de 18MeV

Cono (cm^2)	SSD		
	103,16 cm	113,16 cm	123,16 cm
6	17,05	11,65	8,115
10	18,57	14,08	10,78
15	18,88	14,6	11,57
20	19,44	15,44	12,48
25	19,74	15,77	12,7

Tabla B. 5. Valores de carga medidos para todos los tamaños de cono y a diferentes SSD (100, 110 y 120 cm mas d_{max}) utilizando un haz de electrones de 18 MeV

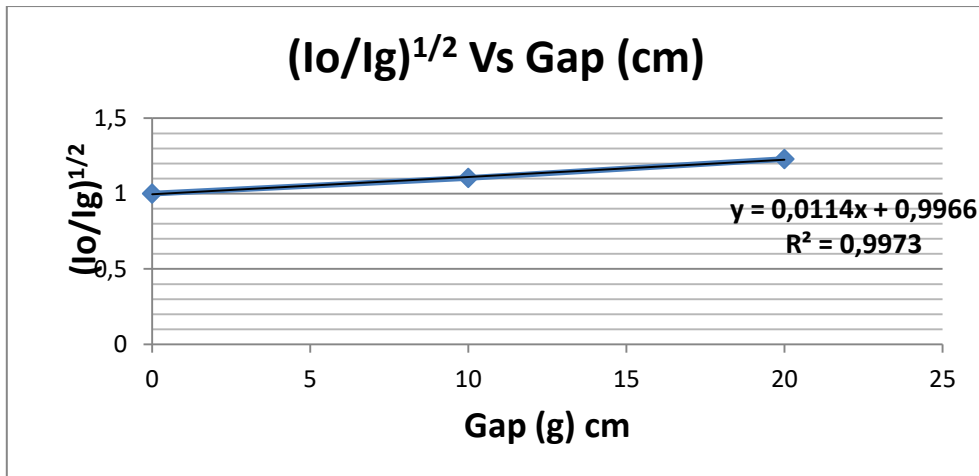


Figura B. 21. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 18MeV y un aplicador de 6x6 cm²

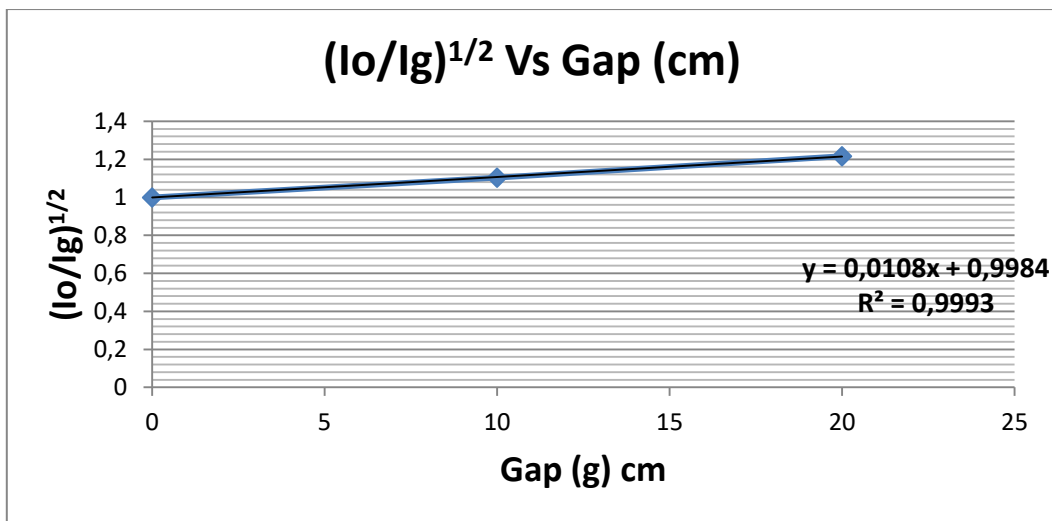


Figura B. 22. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 18MeV y un aplicador de 10x10 cm²

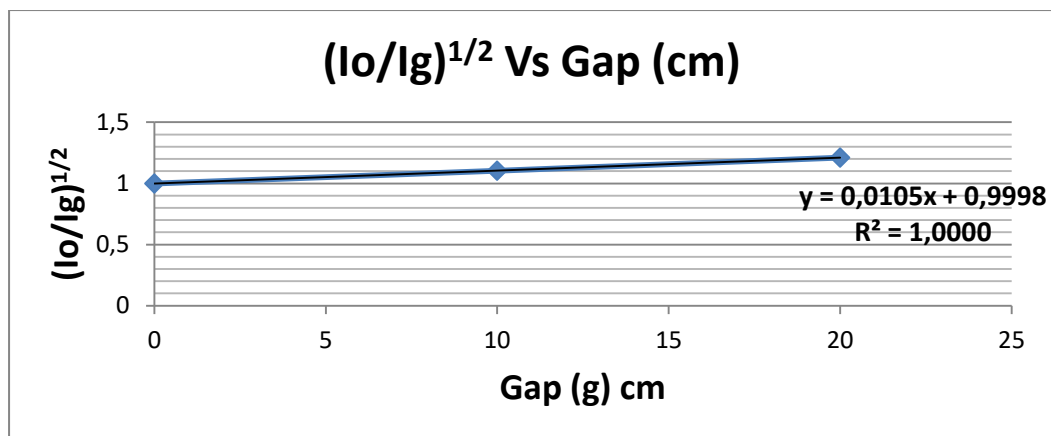


Figura B. 23. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 18 MeV y un aplicador de 15x15 cm²

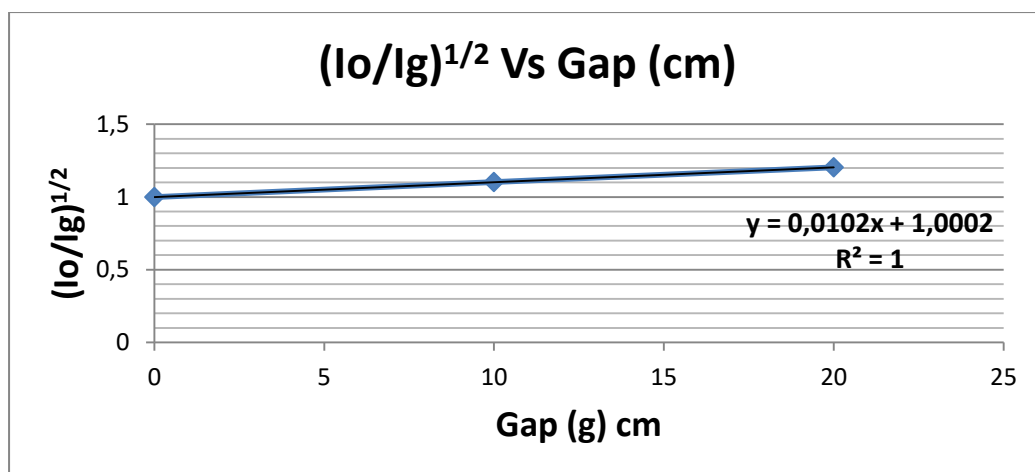


Figura B. 24. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 18 MeV y un aplicador de 20x20 cm²

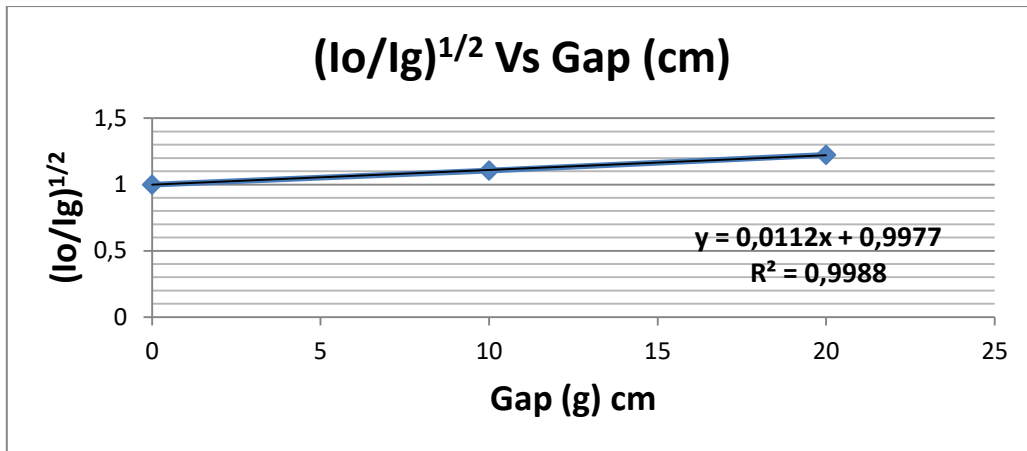


Figura B. 25. Gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre carga medida a una SSD extendida (I_g) de la SSD estándar (I_o) en función del gap o diferencia entre la distancia extendida y la estándar usando un haz de electrones de 18MeV y un aplicador de 25x25 cm²