

70
24



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

DOSIMETRIA PRACTICA DE ELECTRONES
CON ENERGIAS ENTRE 5 Y 14 MeV

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
F I S I C O

P R E S E N T A :

ADRIAN ZAMORA FONSECA



MEXICO, D. F.

1991

FALLA DE ORIGEN



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

INTRODUCCION.....	3
-------------------	---

1 CONCEPTOS PRELIMINARES

1.1	INTRODUCCION AL PRIMER CAPITULO.....	7
1.2	INTERACCION DE LA RADIACION CON LA MATERIA.....	9
1.2.1	Interacción de los electrones con la materia.....	9
1.2.2	Interacción de los fotones con la materia.....	18
1.3	ENERGIA DEPOSITADA EN LA MATERIA POR LOS ELECTRONES....	19
1.4	ABSORCION DE ENERGIA POR LA INTERACCION DE UN HAZ DE ELECTRONES CON LA MATERIA.....	24
1.5	DOSIMETRIA Y CALCULO DE LA DOSIS ABSORBIDA.....	31
1.5.1	Definiciones de equilibrio de partículas cargadas, de exposición y de dosis absorbida.....	31
1.5.2	Dosimetría.....	34
1.5.3	Teoría del cálculo de dosis absorbida.....	36
1.6	INSTRUMENTOS BASICOS PARA LA DOSIMETRIA DE ELECTRONES. .	43
1.6.1	Cámara de ionización y cable triaxial.....	43
1.6.2	Electrometro.....	47
1.6.3	Fantoma.....	48

2 PROTOCOLOS DE DOSIMETRIA

2.1	INTRODUCCION AL SEGUNDO CAPITULO.....	50
2.2	ESTRUCTURA DE UN PROTOCOLO DE DOSIMETRIA.....	52
2.3	CONTENIDO DE LOS TRES PROTOCOLOS DE DOSIMETRIA POR COMPARAR.....	54
2.3.1	HOJAS DE TRABAJO DE LOS PROTOCOLOS, PARA LA DOSIMETRIA DE ELECTRONES.....	56
2.3.2	CONTENIDO COMUN DE LOS TRES PROTOCOLOS.....	57
2.3.3	DIFERENCIAS DE CONTENIDO DE LOS TRES PROTOCOLOS.....	72
2.4	TABLA DE COMPARACION DEL CONTENIDO DE LOS PROTOCOLOS. .	77

3 RESULTADOS EXPERIMENTALES

3.1	INTRODUCCION AL TERCER CAPITULO.....	82
3.2	DISPOSITIVO EXPERIMENTAL.....	83
3.3	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	84
3.4	RESULTADOS.....	85
3.4.1	Verificación de los instrumentos.....	86
3.4.2	Curvas de porcentaje de ionización en profundidad.....	88
3.4.3	Resultados de las mediciones.....	94
3.4.4	Resultados de los cálculos de la dosis absorbida en agua.....	96

4 ANALISIS Y CONCLUSIONES

4.1	INTRODUCCION AL CUARTO CAPITULO.....	97
4.2	ANALISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	98
4.2.1	Análisis de los parámetros del haz.....	98
4.2.2	Análisis de los cálculos de los factores de calibración de dosis absorbida en el aire de la cámara y de los cálculos de la dosis absorbida en agua.....	102
4.3	CONCLUSIONES DEL TRABAJO DE TESIS.....	107

BIBLIOGRAFIA.....	111
-------------------	-----

ANEXOS

ANEXO 1	FORMULAS DE LOS PODERES DE FRENADO MASICO POR COLISION Y POR RADIAION PARA ELECTRONES.....	116
ANEXO 2	HOJAS DE LOS CALCULOS DE LOS FACTORES DE CALIBRACION DE LA DOSIS ABSORBIDA EN EL AIRE DE LA CAMARA, PARA CADA PROTOCOLO.....	119
ANEXO 3	EJEMPLOS PARA EL LLENADO DE LAS HOJAS PARA EL CALCULO DE LA DOSIS ABSORBIDA EN AGUA, PARA ELECTRONES DE 7 MeV.....	127

AGRADECIMIENTOS

INTRODUCCION

La física de las radiaciones incluye el estudio de la interacción de las partículas y las ondas electromagnéticas con la materia y los efectos que en ella producen.

Las partículas y las ondas electromagnéticas emitidas por alguna fuente son llamadas, sin distinción, radiaciones. Las radiaciones que tienen la propiedad de producir ionización en la materia reciben el nombre de radiaciones ionizantes y son de gran interés práctico.

Una clase especial de radiaciones ionizantes son los electrones con energías del orden de decenas de millones de electrón-Voltios (MeV), que los convierte en una opción aplicable en la rama médica de la radioterapia, para el tratamiento de pacientes con cáncer.

Para esta aplicación de los electrones, es indispensable conocer con precisión la dosis absorbida o cantidad de energía que depositan en la materia, ya que el control sobre la dosis absorbida evita el peligro, por un lado, de que una sobredosis dañe a la persona bajo tratamiento y por otro lado, el que una dosis deficitaria brinde la posibilidad de que el mal recurra.

Para cuantificar la dosis absorbida por radiación es

necesario realizar la dosimetría en la fuente de radiación. Para la dosimetría de electrones con energías entre 1 MeV y 50 MeV, diferentes organismos y comités del área de la física médica en el mundo han elaborado protocolos de dosimetría (llamados simplemente protocolos) para medir la dosis absorbida en fuentes que se utilizan en centros hospitalarios.

Entre los protocolos existen diferencias tanto en el contenido como en algunos de los valores de los factores que son utilizados en los cálculos de la dosis absorbida. Esto y la familiarización que alcanzan los usuarios con alguno de los protocolos, ha ocasionado preferencias para el uso de uno u otro sin considerar que independientemente del protocolo que se use, lo que se espera es que la dosis absorbida que se logra medir es, dentro del error experimental, igual en cualquier caso.

Este trabajo de tesis consiste en la comparación de los resultados del cálculo de la dosis absorbida, en agua, para haces de electrones utilizando tres protocolos diferentes, y los objetivos son:

- 1) Comprobar que se llega a los mismos resultados con tres diferentes protocolos para la dosimetría de electrones de alta energía, en el intervalo de energías de 7 MeV a 18 MeV,
- 2) Clarificar el contenido de cada uno de los protocolos, señalando las diferencias tanto de contenido como de notación,
- 3) Hacer un aporte a los usuarios de estos protocolos en nuestro país, mostrando el manejo de los protocolos de manera simplificada, incluyendo las actualizaciones de los mismos, y

- 4) Dar propuestas para el uso de los protocolos, en base a la experiencia de este trabajo.

Desde hace varios años se han reportado trabajos relacionados con los protocolos, en los que se realizan diversas clases de comparaciones. Existen trabajos de comparación entre instrumentos para dosimetría o entre distintos tipos de radiación. Por esta razón, es muy importante precisar que en este trabajo de tesis la comparación se pretende realizar entre diferentes propuestas de procedimiento (protocolos de dosimetría) para la medición de la dosis absorbida en agua con un haz de electrones.

El trabajo de comparación de los tres protocolos se compone de una parte teórica y una parte experimental.

La parte teórica presenta los fundamentos de la interacción de los electrones y los fotones con la materia y se describe el comportamiento de un haz de electrones provenientes de un acelerador lineal de electrones, cuando estos penetran en la materia. Se incluyen las definiciones de cantidades dosimétricas y los conceptos teóricos de la dosimetría desarrollados en la teoría de Bragg-Gray y la corrección a ésta por Spencer-Attix. Se describe además, la teoría para el cálculo de dosis absorbida y lo relacionado a la instrumentación básica para la dosimetría (capítulo 1).

Posteriormente (capítulo 2) se describen los contenidos de los tres protocolos por comparar, presentando un resumen de las semejanzas y las diferencias.

En lo experimental, se incluye una descripción del dispositivo experimental de uso común en la dosimetría de electrones y el reporte de los resultados de la dosimetría llevada a cabo con cada protocolo, para las energías nominales de los electrones de 7, 10, 12, 15 y 18 MeV (capítulo 3).

En la parte final del trabajo (capítulo 4) se presenta el análisis de los resultados y las conclusiones derivadas de los mismos.

Los protocolos incluyen las recomendaciones para la dosimetría de electrones en diferentes materiales, pero en este trabajo la dosimetría se realiza en agua.

Por tratarse de una comparación, los valores necesarios para los diferentes cálculos serán tomados directamente de las tablas que incluye cada protocolo.

Respecto a las referencias bibliográficas, el lector encontrará, a lo largo del trabajo, anotado un número entre paréntesis (en tipo de letra pequeño, por ejemplo (10)) que corresponde al número de la fuente bibliográfica.

Finalmente, es necesario aclarar que la propuesta original para este trabajo, iniciado en junio de 1990, se planteó para la dosimetría de electrones con energías entre 5 y 14 MeV. Sin embargo, por razones técnicas, fué conveniente emplear un acelerador de electrones que permite trabajar en el intervalo de energías entre 7 y 18 MeV. Definitivamente, este cambio en el intervalo de energías no influye en absoluto en el desarrollo del trabajo, ni en los resultados que de él se desprenden, por lo que el nombre original del trabajo se ha conservado.

CAPITULO 1

CONCEPTOS PRELIMINARES

1.1 INTRODUCCION AL PRIMER CAPITULO.

Para introducirnos al conocimiento de la dosimetría de electrones, es conveniente dar inicio con la exposición del tema de la interacción de la radiación con la materia (1.2), presentando el caso de los electrones (1.2.1), así como una breve exposición del caso de los fotones (1.2.2).

Una premisa en el estudio de las radiaciones, es que la interacción de la radiación con la materia se lleva a cabo dependiendo del tipo y energía de la radiación, y del número atómico y de la densidad del material en el que la radiación incide.

El término interacción se refiere al proceso por medio del cual la energía y/o la dirección de la radiación incidente es alterada.

Uno de los resultados inmediatos de la interacción de los electrones, y de cualquier tipo de radiación ionizante con la materia, es el depósito de energía en la misma. La cantidad de

energía depositada por los electrones en la materia se cuantifica con los datos que se tienen acerca del coeficiente de interacción para partículas cargadas, denominado poder de frenado másico total, que se compone básicamente de dos términos: el poder de frenado másico por colisión y el poder másico de frenado por radiación. Al respecto, el apartado 1.3 contiene la explicación de estos coeficientes de interacción de los electrones con la materia.

Para completar el análisis de la interacción de los electrones con la materia, tomando especial consideración en el caso de un haz de electrones de uso clínico, es necesario abordar el tema de las curvas de distribución de energía y las curvas de absorción de energía, pues de estas últimas se logran precisar algunos parámetros que caracterizan el haz, y que son de gran utilidad en la dosimetría (1.4).

La dosimetría de la radiación nos conduce a la determinación de la dosis absorbida en un material. Para ello, el apartado 1.5 comienza con la definición de equilibrio de partículas cargadas y la definición de dos cantidades dosimétricas de importancia general: la exposición y la dosis absorbida (1.5.1). Posteriormente, en el apartado 1.5.2 se describe lo que es dosimetría y el apartado 1.5.3 ofrece la teoría del cálculo de la dosis absorbida, a partir de la teoría de Bragg-Gray y la corrección que a la misma realizaron Spencer y Attix.

En el apartado 1.6 se mencionan los instrumentos que se utilizan en la dosimetría, describiendo sus características deseadas y las pruebas de aceptación a las que deben ser sometidos algunos de ellos.

1.2 INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LA MATERIA.

1.2.1 Interacción de los electrones con la materia.

El electrón es una partícula ligera cuya masa en reposo es igual a $m_0 = 9.11 \cdot 10^{-31}$ kg. Su carga eléctrica es negativa y su valor es $e = 1.602 \cdot 10^{-19}$ Coulomb, conocida como carga eléctrica elemental. Estas constantes físicas del electrón son determinantes en su forma de ejercer la interacción con la materia.

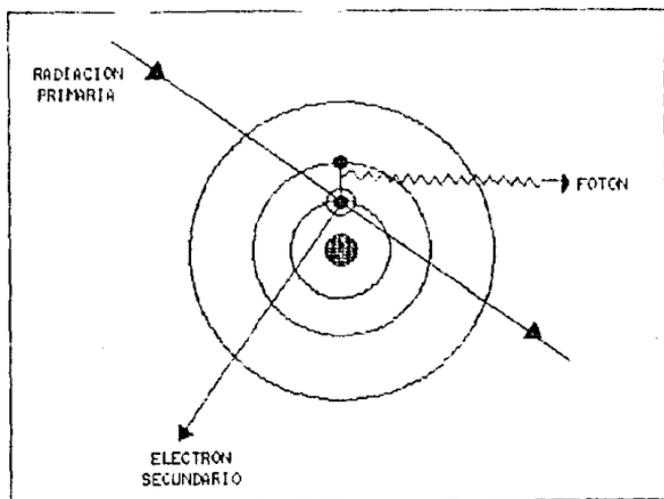
La probabilidad de que un electrón pase a través de una capa de materia sin sufrir interacción es nula. Un electrón que ejerce interacción con la materia, entra en colisión con prácticamente cada átomo que encuentra en su trayectoria. En cada colisión, el electrón transfiere fracciones pequeñas de energía cinética y además sufre desviaciones en su trayectoria, lo que conduce al electrón a frenarse aproximadamente de manera continua, llegando a detenerse en un punto denominado fin de trayectoria. A este proceso de frenado se le da el nombre de aproximación de frenado continuo o CSDA (del nombre inglés Continuous Slowing-Down Approximation).

En el proceso de frenado del electrón, una cantidad considerable de la energía que el electrón pierde se puede invertir para poner en movimiento a algunos electrones que son lanzados completamente fuera del resto del átomo al que, antes de la colisión, pertenecían. A este proceso de separación completa de un electrón del resto del átomo al que pertenece se le denomina ionización y para que ésta se produzca se requiere energía, que generalmente se mide en unidades de electrón-Volt (eV). Como ejemplo, un electrón de 1 MeV que incide en aire pierde 2.13 keV por centímetro recorrido en aire, produciendo 85 pares de iones por centímetro de trayectoria.

Otra parte de la energía que el electrón pierde se puede

invertir en la producción de fotones, que tienen la propiedad de transportar energía a distancia, lejos de la vecindad de la trayectoria del electrón. Los fotones se originan ya sea por el cambio en la aceleración del electrón mismo, principalmente al pasar cerca de un núcleo atómico, o cuando los electrones atómicos, que pasan de un nivel de energía a otro de energía menor, cubren la vacancia dejada en una ionización. Los fotones que se producen por el cambio en la aceleración del electrón reciben el nombre de fotones de bremsstrahlung (nombre en alemán que significa radiación de frenado). La figura 1.1 muestra un ejemplo de ionización y los productos resultantes.

Figura 1.1: Ejemplo de una ionización y las dos clases de radiación resultante.



Otros fenómenos originados en la pérdida de energía del electrón son la producción de calor en el medio, el desplazamiento de algunos átomos de su posición original y la producción de reacciones químicas que dependen de la configuración de los átomos

participantes. A energías del orden de los MeV se tiene el efecto Čerenkov, la producción de neutrones, de positrones (del orden de 10^{-2} positrones por electrón) en la producción de pares por la reabsorción de bremsstrahlung, las reacciones fotonucleares con el lanzamiento de nucleones por bremsstrahlung (llamada resonancia gigante y que es el modo dominante de absorción de bremsstrahlung por el núcleo y puede describirse como la excitación y oscilación de los nucleones) y las reacciones electronucleares que se refieren a la interacción de un electrón con el núcleo y que son menos probables que las reacciones fotonucleares, siendo estas dos últimas relevantes en la determinación de la energía de los electrones y fotones de un haz de electrones (ϕ).

Desde otro punto de vista, un primer resultado que se tiene de la interacción de un electrón con la materia consiste en que el electrón da origen a nuevas partículas que bien pueden ser otros electrones (partículas cargadas y directamente ionizantes, llamadas también rayos delta) o fotones (partículas no cargadas e indirectamente ionizantes). De aquí en adelante, llamaremos electrón primario al electrón incidente, y radiación secundaria será el nombre utilizado para referirnos a las partículas subsecuentes (electrones y fotones), que resultan de la interacción de la radiación primaria con la materia.

Consideremos la interacción de un electrón con la materia como evento único. La trayectoria general de frenado de un electrón primario consta de la trayectoria tortuosa del mismo, y varias ramificaciones que corresponden a las trayectorias de la radiación secundaria. En la figura 1.2 se representa la trayectoria posible de un electrón primario. Las ramificaciones onduladas corresponden a las trayectorias de los fotones y las ramificaciones en forma de curva continua dan idea de las trayectorias de los electrones secundarios.

Debido a que en la deceleración de un electrón ocurren una

Figura 1.2: Representación de las trayectorias de un electrón primario y de la radiación secundaria. Las curvas continuas representan las trayectorias de los electrones y las líneas onduladas las de los fotones (γ).

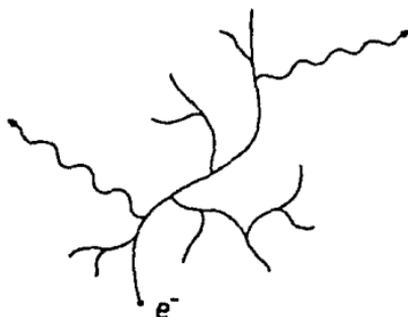
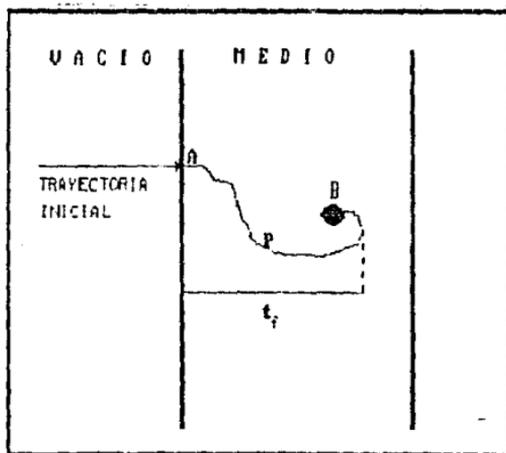


Figura 1.3: Se ilustran los conceptos de camino recorrido (p), correspondiente a la distancia total desde A a B, y el alcance proyectado correspondiente al valor esperado de la máxima penetración lineal de un electrón en su dirección original (t_p) (21).



multitud de interacciones, su trayectoria tiende hacia el valor esperado que se observaría como valor medio para una población muy numerosa de electrones. Dicho valor se llama alcance de una partícula cargada y representa el camino (ρ) que un electrón recorre en un medio dado, hasta alcanzar el reposo. El alcance se diferencia del parámetro llamado alcance proyectado (t) de una partícula cargada en un medio dado, y que corresponde al valor esperado de la máxima penetración lineal (t_r) de un electrón en la materia, en su dirección inicial (ρ, ρ_0). La figura 1.3 ilustra los conceptos de alcance y alcance proyectado.

Para electrones que inciden en medios de bajo número atómico, el alcance es comparable al alcance proyectado. La figura 1.4 muestra la curva de alcance v.s. energía de los electrones en agua (ρ) y la tabla 1.1 muestra algunos valores del alcance de los electrones para medios como el agua, el aire y el plomo, en función de la energía (ρ_0), según la aproximación CSDA.

Figura 1.4: Alcance de los electrones en agua en g/cm^2 , según la aproximación de frenado continuo (9).

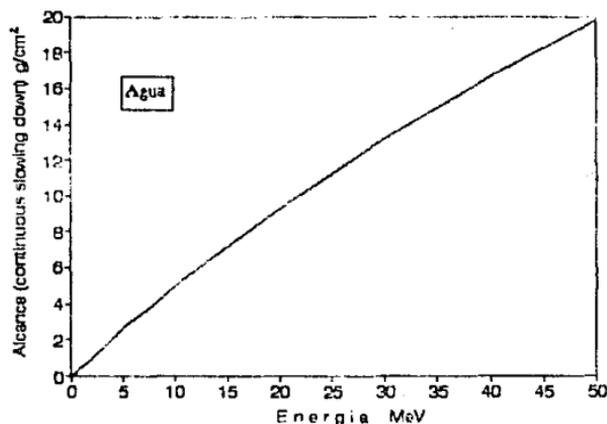


Tabla 1.1: Algunos valores de alcance de los electrones en agua, aire y plomo, en función de la energía, según la aproximación CSDA (21).

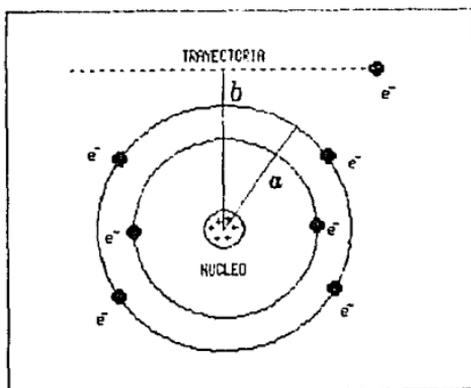
ALCANCE CSDA (g/cm ²)			
ENERGIA (MeV)	AGUA	AIRE	PLOMO
1	0.437	0.491	0.784
5	2.550	2.74	3.673
10	4.975	5.192	6.133

El segundo resultado de la interacción de un electrón con la materia se obtiene al seguir la trayectoria de toda la radiación secundaria. Esta, al igual que el electrón primario, volverá a ejercer interacción con la materia en una sucesión de colisiones - producción de partículas - colisiones, donde la constante será la transferencia y el depósito de energía tanto en la vecindad, como a distancia de la partícula primaria. Este proceso se repetirá hasta que la energía de la radiación secundaria no sea suficiente para que el proceso se sostenga (3).

La interacción de los electrones con la materia es de tipo Coulombiano debido a que los electrones están rodeados por su campo de fuerza eléctrica de Coulomb. Los eventos posibles, y que son de mayor importancia en la interacción Coulombiana de los electrones con la materia, se pueden caracterizar por medio de dos parámetros: el parámetro de impacto b y el radio del átomo a . El parámetro de impacto es la distancia desde el centro del átomo hasta la línea perpendicular correspondiente a la trayectoria del electrón, como se puede apreciar en la figura 1.5.

Cuando un electrón pasa a una distancia considerable del átomo, $b \gg a$, se dice que ocurre una interacción 'blanda' porque el campo Coulombiano del electrón afecta al átomo en su totalidad excitando éste a mayores niveles de energía y a veces ionizándolo, al lanzar fuera a electrones de la capa de valencia del átomo. El efecto neto es la transferencia de pequeñas cantidades de energía (pocos eV). La colisión blanda es el tipo de interacción más probable de un electrón con la materia, porque los valores de $b \gg a$

Figura 1.5: Parámetros importantes en la colisión de electrones con los átomos: el radio atómico a y el parámetro de impacto b (21).



son mucho más probables, y ocurre con mayor probabilidad a energías por debajo de un MeV.

Una colisión 'dura' se presenta cuando $b \sim a$, es decir, cuando b es del orden de las dimensiones del átomo. En este caso es más esperado que ocurra que el electrón incidente vaya a interactuar primero con un sólo electrón atómico, que será lanzado fuera del átomo con una considerable energía cinética que disipa a lo largo de una trayectoria diferente de la del electrón original.

En la colisión entre dos electrones, que tienen igual masa y la misma carga eléctrica, existe la indistinguibilidad entre el electrón incidente y el electrón atómico que emerge después de la colisión. Por simplicidad se define el electrón incidente como aquél que al emerger tiene la energía cinética mayor (7,8). De esta manera se restringe la transferencia de energía a valores por debajo del valor $\frac{1}{4} m_0 v^2$; con m_0 la masa en reposo del electrón y v la velocidad del electrón incidente.

Aunque las colisiones duras son menores en número, comparadas con las blandas, las fracciones de energía gastada por los electrones primarios en estos dos procesos son generalmente comparables.

Cuando el parámetro de impacto es mucho menor que el radio del átomo, es decir, cuando $b \ll a$, la interacción del campo de fuerza Coulombiano toma lugar principalmente con el núcleo atómico. Hay dos casos que se distinguen por los resultados respecto a la transferencia de energía. Cuando el electrón es dispersado elásticamente, es decir, que la energía total del sistema en colisión es la misma antes y después de la colisión, se tiene un mecanismo importante para la desviación de los electrones de su trayectoria original (dispersión). Cuando el electrón es dispersado inelásticamente, es decir, la energía cinética total del sistema en colisión se altera, se tiene una interacción radiativa en la cual un fotón es emitido. En este caso el electrón no es desviado, pero cede una parte significativa de su energía cinética al fotón de bremsstrahlung y esto ocurre con mayor probabilidad a energías del electrón del orden de los MeV.

1.2.2 Interacción de los fotones con la materia.

A diferencia de los electrones, los fotones tienen mayor penetración en la materia porque carecen de masa y de carga eléctrica y tienen menor probabilidad de interacción, pero puede bastar una sola interacción para que puedan perder toda su energía. Cuando los fotones entran en interacción con la materia, producen ionización y excitación en ella bajo los siguientes efectos: el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton y la formación de pares; efectos que han sido ampliamente estudiados (4.6.0). Cada efecto ocurre en un intervalo de energía bien conocido y, aunque son independientes, pueden los tres coexistir predominando

uno u otro según la energía de los fotones.

Del efecto fotoeléctrico es importante resaltar que de la interacción resulta un electrón que se lanza fuera del átomo al que pertenece, siempre que la energía transferida sea mayor a aquélla que lo mantiene amarrado al átomo.

A una energía mayor, el efecto predominante será el efecto Compton, que se caracteriza por el lanzamiento de un electrón fuera del átomo y la dispersión del fotón incidente, el cual emerge con una longitud de onda mayor y menor energía.

En cuanto a la formación de pares el umbral energético para que este suceda es de 1.02 MeV. El par formado consta de un electrón y un positrón. Este último se aniquila al recombinarse con otro electrón del medio, produciendo dos fotones, cada uno con energía igual a 0.51 MeV. La probabilidad de formar pares aumenta con la energía del fotón.

Por otra parte, cuando un haz de fotones incide sobre un material, la intensidad del haz disminuye después de atravesar una capa de cierto espesor del material. Esto se debe al efecto de absorción de energía en el material y al efecto de dispersión en el material. Este último efecto produce la desviación de los fotones de su trayectoria original aumentando por un lado, la longitud de onda de los fotones desviados y por otro lado, disminuyendo la frecuencia de los mismos. De esta manera, la atenuación de un haz de fotones corresponde a la suma resultante de la dispersión y de la absorción.

Lo anterior se puede apreciar en el siguiente experimento. Supongase un haz de fotones monoenergéticos de intensidad inicial, I_0 , al que se interpone una barrera de espesor d . La intensidad detectada a la salida de la barrera, I , en 'condiciones de haz estrecho' (o sea, cuando solamente una fracción despreciable de

presenta algunos valores del coeficiente másico de atenuación para el agua y el aire, en función de la energía (σ).

Tabla 1.2: Valores del coeficiente másico de atenuación para agua y aire, en función de la energía (σ).

ENERGIA (FOTONES)	$(\mu/\rho)_{\text{aire}}$ cm^2/g	$(\mu/\rho)_{\text{agua}}$ cm^2/g
1.0 keV	3673	4083
1.25 MeV (Co60)	0.0569	0.0632
10.0 MeV	0.0205	0.0222

1.3 ENERGIA DEPOSITADA EN LA MATERIA POR LOS ELECTRONES.

La manera de cuantificar la pérdida de energía de los electrones en la interacción con la materia se expresa mediante el poder de frenado másico total que, en general, se define como el valor esperado de la pérdida total de energía por unidad de longitud de trayectoria recorrida x , por una partícula cargada de tipo y , con energía cinética T , en un medio absorbente de número atómico Z y densidad ρ :

$$\left(\frac{dT}{dx} \right)_{y,T,Z}$$

y sus unidades usualmente se reportan en $\text{MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{g}$ (los subíndices se pueden omitir, siempre que no exista posibilidad de confusión). Basta multiplicar el valor dado en $\text{MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{g}$ por el factor 1.602×10^{-14} para obtener un nuevo valor que se expresará en unidades del sistema internacional en $\text{Jm}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$.

Por la descripción anterior de los posibles eventos en la interacción de los electrones con la materia, llega a ocurrir que se desea conocer de qué manera el electrón pierde energía. Para conocer el destino de la energía perdida del electrón, el poder de

frenado másico total puede dividirse principalmente en el poder de frenado másico por colisión (mass collision stopping power), y el poder de frenado másico por radiación (mass radiative stopping power).

El poder de frenado másico por colisión representa la cantidad de energía perdida por el electrón, por unidad de longitud de trayectoria recorrida, resultante de la suma de las colisiones blanda y dura que producen ionización y excitación en la vecindad de la trayectoria del electrón primario, es decir, incluye todas las pérdidas de energía por colisiones de las partículas las cuales producen directamente electrones secundarios y excitaciones atómicas e incluye también las pérdidas de energía debidas a la producción de radiación Čerenkov (la energía que se emite en forma de radiación Čerenkov es una fracción despreciable, menor al 0.1%, comparada con la energía que un electrón gasta en los procesos de ionización y excitación atómica por medio de colisiones blandas, y usualmente es poco importante en aspectos radiológicos (p.21)).

El poder de frenado másico por radiación incluye todas las pérdidas de energía de los electrones primarios por bremsstrahlung.

Así, el poder de frenado másico total es la suma de las contribuciones por colisión y por radiación:

$$\left(\frac{dT}{\rho dx}\right) = \left(\frac{dT}{\rho dx}\right)_{\text{colisión}} + \left(\frac{dT}{\rho dx}\right)_{\text{radiación}}$$

en donde el poder de frenado másico por colisión es:

$$\left(\frac{dT}{\rho dx}\right)_{\text{colisión}} = \left(\frac{dT}{\rho dx}\right)_{\text{blanda}} + \left(\frac{dT}{\rho dx}\right)_{\text{dura}}$$

En el anexo A.1 se pueden consultar las fórmulas para los términos de colisión y de radiación para electrones. Aquí sólo se

presentará el análisis de las fórmulas a fin de comprender las contribuciones del poder de frenado másico por colisión y del poder de frenado másico por radiación, en función de la energía.

El poder de frenado másico por colisión para electrones (ec. 3 del anexo 1) es proporcional al número de electrones por gramo del medio y al logaritmo natural de la energía cinética T del electrón, y varía inversamente con el cuadrado de la velocidad del electrón. Esto significa que para electrones de baja energía las pérdidas de energía son principalmente por ionización y serán mayores en medios cuyo potencial de ionización (conocido también como energía de ionización y representa la cantidad de energía necesaria para separar un electrón de un átomo) sea mayor. A mayor energía de los electrones, su velocidad aumenta y las pérdidas de energía serán debidas principalmente a excitación y de mayor valor en medios de mayor potencial de ionización.

La fórmula incluye algunos factores de corrección. Uno de ellos es el factor δ , que representa la corrección por el efecto de polarización o efecto de densidad, tan importante en el caso de los electrones y particularmente relevante en el área de la física médica, donde se utilizan cámaras de ionización para mediciones en haces de electrones de energía superior a los 2 MeV (21).

El efecto de polarización influye en los procesos de colisión blanda (21) y se produce porque "el paso de una partícula cargada a través de un medio resulta en la polarización de los átomos del medio, y esta polarización, a su vez, debilita el campo electromagnético que actúa sobre la partícula logrando de esta forma reducir el poder de frenado. Esta reducción es particularmente fuerte en medios densos, y es, por lo tanto, llamada el efecto de densidad. A mayor velocidad de la partícula, es mayor el efecto de densidad porque, en virtud de la contracción de Lorentz, las colisiones distantes vienen a ser más importantes" (15).

El factor δ es una función de la composición y densidad del medio absorbente, y del parámetro expresado por el $\log_{10}(mv/m_0c)$, donde mv es el momento relativista del electrón y m_0 la masa en reposo del electrón. El factor δ viene a ser importante para energías por arriba de la energía de la masa en reposo del electrón $E_0 = m_0c^2 \cong 0.5 \text{ MeV}$ (z_1). Por ejemplo el factor δ para agua a energías de los electrones de 1 y 10 MeV son: 0.2428 y 2.292, respectivamente. Estos valores corrigen el poder de frenado másico por colisión en agua, los cuales estaban siendo sobrestimados en un porcentaje del orden del 1.5 % hasta antes de la corrección por polarización.

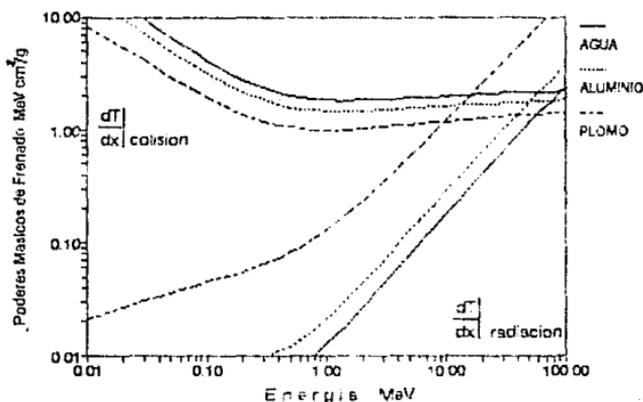
Por otra parte, la fórmula del poder de frenado másico por radiación para electrones (ec. 4 del anexo 1) depende de la energía cinética del electrón T y del cuadrado del número atómico del medio Z (a diferencia del poder de frenado másico por colisión que varía proporcionalmente con el número atómico). Esto significa que para electrones poco energéticos, con energía por debajo de 0.5 MeV, el poder de frenado másico por radiación es independiente de T y tiene valores que no cambian de orden de magnitud, pero que son dependientes del cuadrado del número atómico y marcadamente mayores en materiales de mayor densidad. Podemos resumir esto diciendo que a baja energía de los electrones (de 0.01 a 0.1 MeV), es baja la producción de bremsstrahlung, pues los electrones tienen suficiente tiempo para la interacción con los electrones atómicos sin contar con la energía suficiente para dispersarse en los núcleos atómicos.

La contribución más importante del poder de frenado másico por radiación se da a energías de los electrones superiores a $T=0.5 \text{ MeV}$, donde éste varía aproximadamente en proporción a T , es decir, a mayor energía mayor producción de bremsstrahlung. Por ejemplo, para electrones de 10 MeV incidiendo en plomo, el poder de frenado másico por radiación es $\cong 1.5 \text{ MeV cm}^2/\text{g}$, lo que representa el 15% de la energía del electrón incidente que se

invirtió en la producción de bremsstrahlung por unidad de camino recorrido.

La figura 1.7 muestra las curvas del poder de frenado másico por colisión ($dT/dx|_{\text{colision}}$) y por radiación ($dT/dx|_{\text{radiacion}}$) en función de la energía del electrón, para el agua, el aluminio y el plomo.

Figura 1.7: Poderes de frenado por colisión y radiación para electrones en función de la energía, para agua, aluminio y plomo (ρ).



De la figura 1.7 se observa que se tiene mayor producción de bremsstrahlung a medida que la densidad del medio aumenta. También se puede observar que el término por colisión, para energías por arriba de 1 MeV, tiene una variación gradual (de ahí la forma más plana de la curva), y además no hay diferencias notables de un medio a otro.

De lo anterior se puede deducir que la proporción en la cantidad de energía perdida por los electrones en un medio, ya sea

por radiación o por colisión, depende de la energía de los electrones y de la composición del medio. De esta forma, el cociente entre el poder de frenado másico por colisión y el poder de frenado másico por radiación es aproximadamente igual a TZ/n , donde n es una constante cuyo valor, para energías mayores a 3 MeV, es de 700 ± 100 MeV (21). Considerando nuevamente el ejemplo de electrones con energía de 10 MeV, que inciden en plomo ($Z=82$), el cociente de los poderes de frenado másico es cercano a la unidad. Esto significa que con 10 MeV de energía de los electrones que entran en interacción con plomo, la cantidad de energía perdida en colisiones es equivalente a la cantidad de energía gastada en producir bremsstrahlung. En cambio, en el agua las cantidades son equivalentes para energías de los electrones del orden de los 100 MeV.

1.4 ABSORCIÓN DE ENERGÍA POR LA INTERACCIÓN DE UN HAZ DE ELECTRONES CON LA MATERIA.

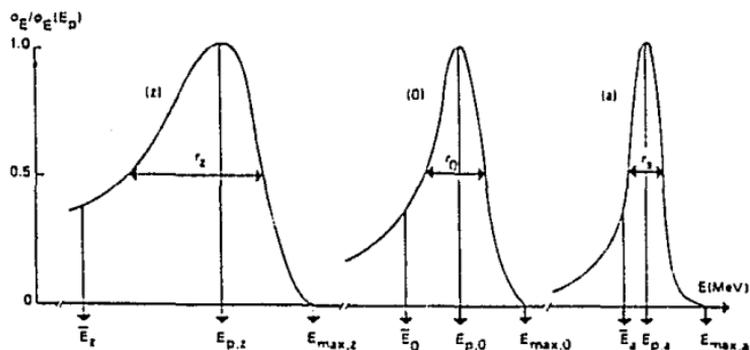
A continuación se describe lo que sucede en la interacción con la materia de un haz no-monoenergético de electrones de energía del orden de MeV, producido por un acelerador lineal de electrones de uso clínico.

La característica más importante de un haz de electrones es normalmente su distribución de energía o su espectro de energía, del que dependen los efectos físicos, químicos y biológicos de la radiación sobre la materia.

Un haz de electrones clínico tiene una distribución de energía desde antes de incidir sobre la ventana de salida del acelerador, la cual depende de un gran número de factores tales como el mecanismo de aceleración y el sistema de manejo del haz. La distribución se altera conforme el haz viaja por medios de distinta composición o en diferentes profundidades en un mismo

medio. Tomando como referencia la figura 1.8, el espectro energético a la salida de la fuente (a), puede caracterizarse por ciertos parámetros: la energía máxima ($E_{max,a}$), la energía media del haz de electrones (\bar{E}_a), la energía más probable del haz de electrones ($E_{p,a}$) y la anchura en energía o anchura a la mitad del máximo del espectro de energía (Γ_a).

Figura 1.8: Espectros energéticos de los electrones y sus parámetros: (a) indica la distribución de energía del haz de electrones antes de hallar la ventana de salida; (o) indica la distribución en la superficie del material y (z) indica la distribución a una profundidad z en el material (23).



A medida que el haz pasa desde la ventana de salida del acelerador hasta la superficie del material, las pérdidas de energía desplazan el espectro a energías inferiores y al mismo tiempo tales pérdidas hacen al espectro más ancho. Esto también pasa cuando los electrones entran en el material, resultando una población de electrones con una mayor variedad de energías. De esta manera la anchura de la curva de distribución de energía a la mitad del máximo del espectro, Γ , aumenta de tal forma que $\Gamma_a < \Gamma_o < \Gamma_z$ donde a, o y z indican, respectivamente, la salida de la

fuelle, la superficie del material y una cierta profundidad en el material. Debido a que el espectro es asimétrico con tendencia a una población mayor de electrones de menor energía, \bar{E}_0 y $E_{p,0}$ no coinciden y \bar{E}_0 será siempre menor que $E_{p,0}$. La diferencia entre $E_{p,0}$ y \bar{E}_0 aumenta con la distribución energética Γ_0 (23).

Consideremos la cantidad radiométrica denominada fluencia de partículas cargadas, Φ . Esta se define como el cociente de (dN) por (da) , donde (dN) es el número de partículas incidentes sobre una esfera de sección transversal (da) :

$$\Phi = dN/da$$

y sus unidades en el sistema internacional son $m^{-2}(s,19)$. De esta manera, cuando el haz de electrones penetra en el material, la fluencia de electrones se extiende a cada punto de su trayectoria y a las regiones circundantes. Esta fluencia se compone de una mezcla de partículas primarias y secundarias. En cada punto del material la fluencia de cada una de estas clases de partículas dependen de los alcances en el material y de la penetración que previamente hubiera alcanzado la radiación original.

Así, en la vecindad de la superficie del medio, la interacción de las partículas primarias con el medio produce una fluencia de partículas secundarias que es menor respecto a la fluencia a una profundidad mayor, porque a medida que se alcanza mayor profundidad aumenta el número total de las interacciones de las partículas secundarias con el medio y, en consecuencia, las partículas secundarias adquieren un carácter significativo como fuente generadora de un mayor número de partículas, en contraposición a la reducción en el número de partículas secundarias generadas por las primarias.

El resultado neto es el aumento de la fluencia de las partículas secundarias hasta la profundidad en la que el decreciente número de las partículas primarias es incapaz de mantener el aumento de partículas secundarias. Este punto

representa un máximo relativo para la fluencia y, a partir de él, la fluencia decae monótonamente. Para los electrones, la profundidad del máximo relativo ocurre cuando las partículas secundarias se acumulan a profundidades del mismo orden que el del alcance de los electrones en el material (s). Por ejemplo, con electrones primarios de 10 MeV provenientes de una fuente colocada a una distancia de 100 cm, y que inciden en agua, se tiene el máximo relativo a una profundidad en agua del orden de 20mm (algunos aceleradores alcanzan el máximo relativo a 17mm y otros a 24mm).

La ionización en un material es proporcional a la carga eléctrica de un sólo signo que se genera. Con instrumentos para la medición de la carga eléctrica es posible cuantificar la ionización a diferentes profundidades, a una distancia fija desde la fuente a la superficie del material.

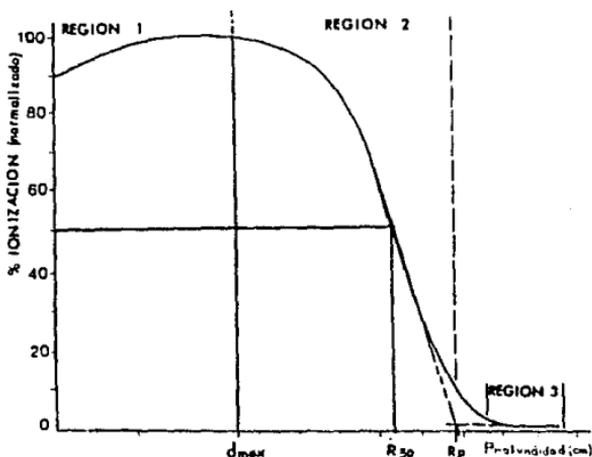
La gráfica de los valores relativos al máximo de la carga colectada, que se obtienen a diferentes profundidades sobre el eje central del haz, se denomina curva de porcentaje de ionización en profundidad. La curva se interpreta como la carga debida a la ionización a medida que la profundidad aumenta. La forma de ésta depende de la energía promedio de los electrones, las dimensiones del haz y del espectro de energías.

Esta curva es el resultado de los procesos de interacción de: a) los electrones primarios, b) los electrones secundarios, y c) los fotoelectrones, electrones Compton y los electrones por pares formados en la reabsorción de bremsstrahlung.

La figura 1.9 muestra una curva de ionización en profundidad de un haz de electrones en agua. La curva se considera formada de tres regiones de interés, conforme la profundidad se incrementa.

Región 1: Abarca desde la superficie hasta el máximo de

Figura 1.9: Curva de ionización en profundidad para un haz de electrones en agua. Se indican tres regiones de interés: Región 1 (Región de acumulación), Región 2 (Región de caída), Región 3 (Región de contaminación). R_p indica la profundidad del alcance práctico (14).



ionización y se conoce como región de acumulación (build-up). La forma de la región y los valores relativos del porcentaje de ionización dependen de los electrones de baja energía que han sido dispersados antes de incidir en el material.

Región 2: Se conoce como región de caída (fall-off). Abarca desde el máximo hasta la línea de base de la curva. En esta región se localiza la profundidad correspondiente a la mitad del máximo de ionización.

Región 3: Se conoce como región de contaminación por Rayos-X, los cuales penetran más allá del alcance de los electrones. Abarca desde el punto de flexión de la curva hasta el final de la

misma, con forma ligeramente asíntótica.

En las aplicaciones, la curva de ionización en profundidad o de dosis en profundidad tiene la característica de proporcionar tres parámetros importantes para la dosimetría. El primero de ellos es la profundidad a la que se localiza el máximo de ionización, conocido como d_{max} . El segundo parámetro es la profundidad a la que se localiza el valor del 50% de ionización, respecto al máximo de ionización, conocido como d_{50} . El tercer parámetro es el alcance práctico de los electrones, que se obtiene de la curva de ionización en profundidad por un método de extrapolación. En este método, la porción media de la curva, que es aproximadamente lineal (región 2), se extrapola para interceptar otra recta extrapolada desde la curva de contaminación. La perpendicular desde el punto de intersección de ambas rectas, en dirección a la base de la curva, tiene la profundidad asociada al alcance práctico y se denota como R_p . Los tres parámetros mencionados aparecen indicados en la figura 1.9.

Para la planeación de un tratamiento, la amplitud de la región 2 y algunos valores porcentuales de ionización respecto al máximo se consideran importantes. Un ejemplo de esto es la profundidad del 85% de ionización respecto al máximo, llamada alcance terapéutico (ρ).

También, en las aplicaciones, es deseable reducir la contaminación por Rayos-X hasta el mínimo, a fin de evitar dosis absorbidas de considerable magnitud en regiones fuera del volumen de interés, por lo que se recomiendan límites superiores para esta contaminación dependiendo de la energía de los electrones. La figura 1.10 muestra el porcentaje, respecto al máximo, de los límites superiores para el nivel de contaminación por Rayos-X, en función de la energía. Por ejemplo, el porcentaje de contaminación por Rayos-X debe ser menor al 5.0% para energías en el intervalo de 1 MeV a 15 MeV ($\rho_{11,14}$).

Figura 1.10: Curva de los límites superiores recomendados para el nivel de contaminación por R-X. El porcentaje, respecto al máximo, es función de la energía de los electrones (14).

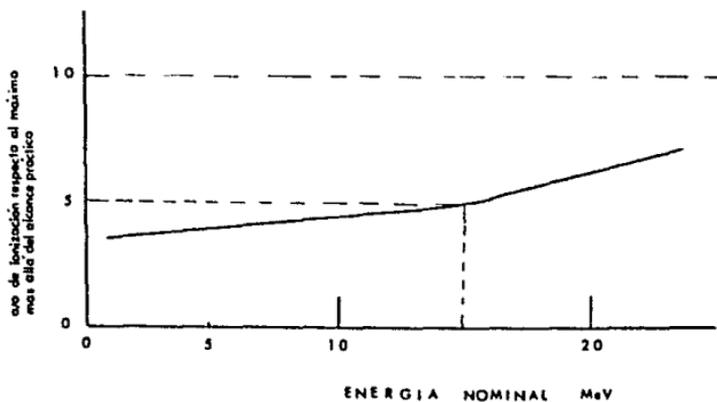
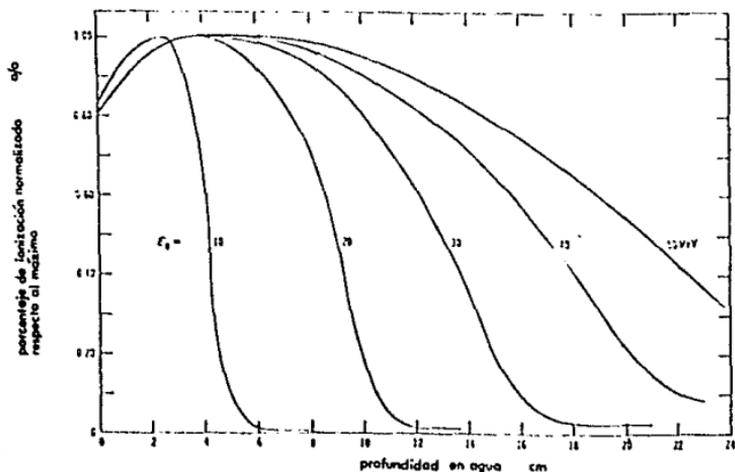


Figura 1.11: Curvas de porcentaje de ionización en profundidad para diferentes energías, en agua (12).



Por otra parte, manteniendo constante la energía de los electrones y variando la densidad del medio se obtiene un marcado aumento en la pendiente de la región 2. Si la densidad del medio se mantiene constante y la energía de los electrones aumenta, la pendiente de la región 2 irá disminuyendo, tal como lo muestra la figura 1.11. En la misma figura se observa que la profundidad del máximo de ionización no varía tanto con la energía, en comparación con el aumento en el porcentaje de contaminación.

Por lo anterior, para un acelerador lineal de electrones, es conveniente obtener la curva de porcentaje de ionización en profundidad para cada energía y, de ser posible, para todos los tamaños del haz de electrones más usuales en los tratamientos. Esto debe ser así porque de cada curva se extraen los parámetros del haz (d_{max} , d_{50} , R_p) y, para cada acelerador, los parámetros dependen de los sistemas de colimación o, en general, de sus características de fabricación.

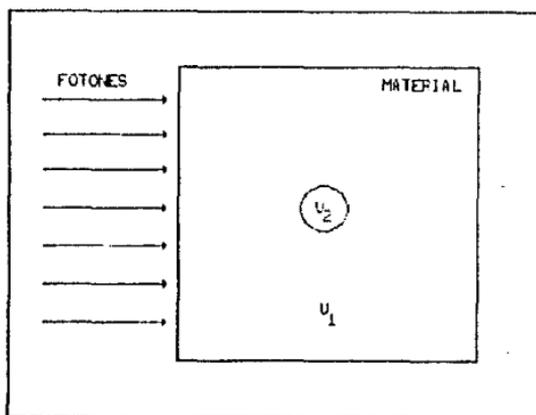
1.5 DOSIMETRIA Y CALCULO DE LA DOSIS ABSORBIDA.

1.5.1 Definiciones de equilibrio de partículas cargadas, de exposición y de dosis absorbida.

1.- Definición de equilibrio de partículas cargadas (o equilibrio electrónico).

Considerese un volumen extenso de aire, V_1 , que es irradiado uniformemente con fotones, como lo muestra la figura 1.12 (la uniformidad de irradiación puede alcanzarse despreciando la atenuación de los fotones en el volumen de aire). En un volumen más pequeño, V_2 , un determinado número de electrones va a ser liberado y estos van a viajar parcialmente en V_2 y en V_1 produciendo iones. V_1 es suficientemente grande para que los

Figura 1.12: Principio de equilibrio de partículas cargadas.



electrones provenientes de V_2 sean completamente frenados en V_1 . En estas condiciones, volúmenes tales como V_2 estarán bajo la interacción de fotones, y el número de electrones liberados y su distribución en energía y dirección va a ser la misma. Estos electrones también van a producir los correspondientes iones a lo largo de su trayectoria. Por simetría, no habrá incremento de los electrones secundarios en V_2 , ya que el número de electrones liberados y su distribución en energía y dirección va a ser el mismo de aquellos que lo abandonan. De esta forma se tienen una condición de equilibrio de partículas cargadas. Además, la ionización producida en V_2 por todos los electrones que pasan a través de él desde V_1 va a ser igual a la ionización total producida en el resto de V_1 por los electrones liberados por los fotones que llegan a V_2 .

La aplicación de este concepto es de mucha importancia en dosimetría y es clave para la validación de magnitudes y cantidades dosimétricas como la fluencia, la exposición y la dosis

absorbida, pues sólo en régimen de equilibrio electrónico estas magnitudes pueden definirse.

2.- Definición de exposición.

La exposición, X , es el cociente de dQ por dm , donde dQ es el valor absoluto de la carga total de los iones de un signo producidos en aire cuando todos los electrones liberados por fotones en una masa de aire dm son completamente frenados en aire.

$$X = dQ/dm$$

Las unidades de exposición, en el sistema internacional de unidades, son Ckg^{-1} y la unidad especial es el röntgen (R), donde:

$$1 R = 2.58 \times 10^{-4} Ckg^{-1}.$$

La exposición no incluye la ionización proveniente de la absorción de bremsstrahlung.

3.- Definición de dosis absorbida.

La dosis absorbida, D , es el cociente del valor esperado de la energía media impartida por la radiación ionizante, $d\epsilon$, a un material de masa dm , contenida en un volumen dV . Esto se expresa con la siguiente ecuación:

$$D = d\epsilon/dm$$

Esta definición es válida para cualquier tipo de radiación ionizante y permite dar a la dosis absorbida una interpretación puntual, ya que con una masa lo suficientemente pequeña, aseguramos que la irradiación es lo necesariamente uniforme para considerar que no habrá fluctuaciones en el valor $d\epsilon/dm$, y por lo tanto el cociente representará la dosis absorbida en un punto dentro de un volumen uniformemente irradiado (2).

Las unidades de dosis absorbida, en el Sistema Internacional de Unidades, son J/kg^{-1} y el nombre especial de las unidades de dosis absorbida es el Gray (Gy), donde:

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}^{-1}.$$

La unidad especial de dosis absorbida es el rad (rad), donde:

$$1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ J/kg}^{-1}.$$

1.5.2 Dosimetría.

El método para la determinación de la dosis absorbida en un punto situado en el seno de un medio irradiado se denomina dosimetría y como la dosis absorbida varía de un medio a otro, es menester que se especifique el material donde se determina. En la actualidad, por el empleo de las radiaciones en múltiples campos, se ha hecho necesario que la dosimetría se practique en ámbitos como el industrial, el de la investigación y el de la salud (1,2).

Si el medio irradiado no es apropiado para servir como instrumento de medida (dosímetro), entonces hay que introducir en él un detector de radiación que sustituye un volumen equivalente de material del medio. Decimos entonces que en el medio se tiene una cavidad llena con un material sensible a la radiación. La cavidad puede tener paredes que delimitan su tamaño y que, generalmente, son de composición diferente a la del medio en el que se introduce.

Existen varios detectores de radiación que se aproximan al concepto de cavidad, pero en el área de la física médica es común el empleo de detectores especiales que reciben el nombre de cámara de ionización. La cámara de ionización se aproxima a la idea de cavidad y hay cámaras de diferente geometría: esféricas, planas o cilíndricas. Una cámara de ionización se caracteriza por estar

de 300 Vdc, aplicado entre la pared y el electrodo central. La pared delimita el volumen sensible donde ocurre la formación de iones, los que se colectan en el electrodo central. Los iones colectados generan una corriente del orden de 10^{-12} Amperes que viaja a través de un cable triaxial conectado a la cámara. Esta configuración beneficia la señal reduciendo el ruido, las interferencias y sobre todo las fugas de corriente (25).

Las características de una cámara de ionización, entre las que se encuentran una elevada eficiencia en la colección de iones y reducido efecto de recombinación de iones con los átomos del gas, hacen de ella un instrumento apropiado para la dosimetría de precisión. Con una cámara de ionización pueden cubrirse amplios intervalos de tasas de dosis absorbida, desde la radiación de fondo que ofrece 10^{-8} Gy/h en agua, hasta tasas de dosis absorbida de 10^6 Gy/s que se presentan a la salida de ciertas fuentes (4) (como se mencionó anteriormente, existen otros detectores de radiación pero aquí sólo se tratará lo concerniente a cámaras de ionización llenas con aire, sin restar generalidad a la formulación teórica para el cálculo de la dosis absorbida).

Con una cámara de ionización se mide la exposición en el material que llena la cavidad de la misma y con un conjunto de medidas de la exposición es factible determinar su factor de calibración de dosis absorbida en ese material. El uso de este factor junto con el conocimiento de las propiedades de frenado y dispersión del medio y del material de la cavidad, nos permiten determinar la dosis absorbida en el medio.

1.5.3 Teoría del cálculo de dosis absorbida.

La teoría del cálculo de la dosis absorbida bajo la idea de la cavidad se expone a continuación, con las formulaciones de

Bragg-Gray y Spencer-Attix.

La determinación de la dosis absorbida descansa en el principio de Bragg-Gray que relaciona la dosis absorbida en un punto de un medio, m , con la dosis absorbida en el material sensible a la radiación, i , que llena la cavidad del detector. La razón de dosis absorbida en los dos medios se expresa con la ecuación de Bragg-Gray (BG):

$$\frac{D_m}{D_i} = \frac{S_m^{BG}}{S_i^{BG}} \equiv S_{m,i}$$

que indica que la relación de dosis absorbida en el medio (D_m) y en el gas de la cavidad (D_i) es igual a $S_{m,i}^{BG}$, la razón de los poderes de frenado másico por colisión en el medio y en el material de la cavidad. Ambas dosis absorbidas están definidas para la misma fluencia de electrones primarios (ϕ_{e0}). Esta relación se justifica suponiendo, entre otras cosas, que:

a) La presencia de la cavidad no perturba la fluencia de electrones, que ocurre cuando el detector se inserta dentro del medio. Por consiguiente, la cavidad debe ser de tamaño limitado respecto al alcance de los electrones en el medio que llena la cavidad, pero que permita la resolución espacial requerida.

b) La energía se deposita en un punto, es decir, no existe transporte de energía pues se espera que la energía se deposite continuamente en un lugar bien localizado.

c) el equilibrio de partículas cargadas existe en ausencia de la cavidad.

La teoría de Bragg-Gray es el inicio de las ideas encaminadas al cálculo de dosis, sin embargo falla en algunos aspectos. Uno de ellos es que no se considera el hecho experimental de la

variación de la ionización por unidad de masa de aire de la cavidad con la presión (10). Otra falla de orden práctico se presenta en la suposición del alcance de los electrones en la cavidad, pues éste no es despreciable comparado con las dimensiones de la misma y por lo tanto b) no se cumple. De hecho la formulación de Bragg-Gray es independiente del tamaño de la cavidad, y por lo tanto algunas modificaciones a ésta se requieren y van a ser dependientes del tamaño de la cavidad.

Para resolver el inconveniente por la suposición b), Spencer-Attix elaboraron un refinamiento a la teoría de Bragg-Gray, donde queda considerado el alcance finito de los electrones secundarios, es decir, que los electrones secundarios con energía superior a un cierto umbral de energía Δ depositan su energía fuera de la cavidad y los de energía menor a Δ la depositan íntegramente en ella. Con esta consideración se elimina el inconveniente de la independencia del tamaño de la cavidad en la teoría de Bragg-Gray. Entonces, la ecuación de Bragg-Gray se corrige en la ecuación de Spencer-Attix (SA) para calcular la dosis absorbida :

$$S_{m,i} = \frac{SA}{D_{gas}} = \frac{D_m}{[S/\rho]_{\Delta,i}} = \frac{[S/\rho]_{\Delta,m}}{[S/\rho]_{\Delta,i}}$$

donde $[S/\rho]_{\Delta,\zeta}$ denota el valor del poder de frenado másico por colisión restringido de un material, y representa la energía disipada por una partícula cargada por unidad de longitud de trayectoria recorrida, a causa de aquellas colisiones en las que la pérdida de energía es menor que Δ . De este modo puede calcularse la razón de dosis absorbida con mayor exactitud al tener en cuenta el tamaño de la cavidad. Una buena aproximación para Δ es el valor de 10 keV, lo cual aunque no se indica explícitamente, se ha tomado en consideración en el reporte de los valores de los poderes de frenado másico por colisión restringido (que son del tipo Spencer-Attix, denotados por L/ρ , y que son

llamados simplemente razón de poderes de frenado y que aquí denotaremos como (S/ρ) (2,10).

En dosimetría práctica, con frecuencia no es posible construir un detector lo suficientemente pequeño y con adecuada sensibilidad. Muchos detectores contienen materiales sensibles a la radiación en los cuales la tasa de dosis absorbida puede variar apreciablemente. Además, el material del detector, por diferir de la del medio, produce que la tasa de fluencia en el medio sea diferente de la tasa de fluencia en el punto del medio donde se quiere medir cuando el detector está ausente.

De esta forma, la cavidad influye en las mediciones por tres causas principales:

1) por la composición de las paredes de la cámara, que se convierten en una interfase entre el medio y el gas,

2) por el gradiente de fluencia que se induce en la dirección del haz de radiación por el cambio de medio, que se traduce en un desplazamiento del punto geométrico de medida, y

3) por los cambios que produce en la atenuación y dispersión en el medio y en la cavidad (5,2,10).

Como no es deseable que la cámara influya en las mediciones, conviene usar un factor de corrección P_u que tome en cuenta la presencia de la cámara. De esta forma se comienza a resolver el inconveniente que se presenta en la suposición a) de la teoría de Brag-Gray. Así, la ecuación de la dosis en un punto p del medio m es:

$$D_m(p) = D_{gas} \cdot (S/\rho)_{m,gas} \cdot P_u$$

El efecto de la extensión espacial del detector es eliminado si se introduce el concepto de un punto efectivo de medida, P_{eff} ,

que puede ser diferente del correspondiente al centro del detector. De esta manera, el detector es colocado de tal forma que Peff esté en el punto de interés. Así, la ecuación anterior se transforma en:

$$Dm(\text{Peff}) = D_{\text{gas}} \cdot (S/\rho) m_{\text{gas}} \cdot Pu$$

A continuación se describe cómo determinar D_{gas} , asumiendo que el gas que llena la cavidad es aire.

La masa m de aire en la cavidad de la cámara es :

$$m = \frac{v}{\rho_{\text{aire}}}$$

donde v es el volumen de la cavidad y ρ_{aire} la densidad del aire.

Por otro lado, en la formación de un par de iones, en aire seco, se consumen 33.97 ± 0.06 J/C de energía (9), cuando se utiliza radiación gamma de Co-60, cuya energía promedio es de 1.25 MeV (9,5,41). Este valor se define como W y es :

$$W = E/\bar{N}$$

siendo \bar{N} el valor medio del número de pares de iones formados cuando la energía cinética inicial E de una partícula cargada es completamente disipada en el aire. El valor de W para aire seco* se supone, pues no existe una demostración experimental, invariable generalmente para energías de fotones o electrones del orden de MeV.

Si se considera que Q/e es el número de cargas de un solo signo, que son producto de la ionización en el gas, la dosis en aire se puede expresar como:

* Por la importancia de W/e , puede ser necesario conocer los comentarios acerca de él, para lo que el lector puede remitirse a las referencias 5,9,37 y 39.

$$D_{\text{aire}} = \frac{Q}{V \rho_{\text{aire}}} \cdot [W/e]$$

que se interpreta como la energía depositada en un punto de la cavidad por unidad de masa de aire (s.e.s.e.).

Sin embargo, para toda cámara, independientemente del tipo de radiación y de la energía (s), el cociente:

$$\frac{D_{\text{aire}}}{Q} = \frac{1}{V \rho_{\text{aire}}} \cdot [W/e] \equiv \text{constante}$$

es una constante y se denomina factor de calibración de dosis absorbida en el aire de la cámara (Nd ó Ngas), para una presión, temperatura y humedad. La interpretación que se da de este factor es que la dosis absorbida en aire es proporcional al número de cargas producidas en la cavidad de la cámara, siempre que la estructura de la cámara no se altere en sus constituyentes mecánicos o eléctricos.

En términos del factor de calibración, la dosis absorbida en aire queda expresada como producto de éste y la carga :

$$D_{\text{aire}} = Q \cdot Nd$$

y por tanto, es obvio que si se mide la carga colectada, la dosis absorbida en el aire de la cámara se puede determinar. La carga Q se mide experimentalmente y el resultado de la medición se corrige por otros factores:

$$Q = l \cdot \rho \cdot C \cdot P \cdot T \cdot f$$

donde:

l la lectura experimental con la cámara, en unidades de carga, sometida a correcciones por efecto de fuga y efecto de polaridad,

$\phi(P, T)$ el factor de corrección por presión y temperatura porque en la cámara de ionización los iones que se forman producen una carga eléctrica que se ve influenciada por la presión, la temperatura, la humedad del aire y la recombinación de los iones con átomos del aire, y

f un factor global que se desglosa en otros factores de corrección como el de tallo (debido a la exposición directa del cable de la cámara al haz de radiación), el factor de saturación (relacionado con la tensión entre los electrodos de la cámara), entre otros, que pueden ser considerados y que obviamente, por ser de corrección, deberán hacerse explícitos.

La dosis absorbida en un medio como el agua, en el punto P_{eff} , puede determinarse usando un instrumento calibrado y aplicando la ecuación:

$$D_{agua}(P_{eff}) = I \cdot \phi(P, T) \cdot N_D \cdot S_{agua, aire} \cdot f \cdot P_u$$

Para propósitos prácticos, el valor de $S_{agua, aire}$ puede usarse considerando cámaras con paredes de material equivalente al agua, de grafito delgado, o plástico delgado con una capa interna de grafito o material equivalente al aire. Para la cámara que se use, se debe asegurar que en la determinación del factor de calibración en un haz de fotones, la incertidumbre sea pequeña y que la cámara sea apropiada para mediciones en haces de electrones (de preferencia una cámara cilíndrica o cámara plana). La posición del punto de medida de la cámara dentro del medio, debe ser la adecuada (ver capítulo 2) a las mediciones con haces de electrones. Los valores de P_u que pueden usarse han sido obtenidos experimentalmente y su valor es menor a la unidad para cámaras cilíndricas en un intervalo de energías comprendido entre 5 y 25 MeV (ϕ).

1.6 INSTRUMENTOS BASICOS PARA LA DOSIMETRIA DE ELECTRONES.

• La instrumentación básica para la dosimetría consta de una cámara de ionización con un cable triaxial (dosímetro), un electrómetro que permita leer carga eléctrica integrada y un simulador o fantoma.

Dentro de la amplia gama de instrumentos que se conocen, comerciales o fabricados en centros de investigación, se deben seleccionar aquéllos que, por sus características, satisfagan las necesidades específicas de la dosimetría y que cuenten con la acreditación de un laboratorio de calibración, el cual otorga un certificado de calibración del equipo de dosimetría después que éste ha sido comparado con patrones de referencia (3,10,23,24).

Sin embargo, independientemente de la selección, estos deben someterse a varias pruebas de aceptación con la finalidad de poder ser usados de manera confiable.

A continuación se expone brevemente el funcionamiento de los mismos y una guía mínima de pruebas que deben soportar los equipos en forma individual.

1.6.1 Cámara de ionización y cable triaxial.

Para la medición de la dosis absorbida se han construido dosímetros entre los que se encuentran las cámaras de ionización llenas con aire. Estas se han perfeccionado logrando ser en la actualidad el instrumento preferido en la dosimetría de las radiaciones ionizantes de altas energías (β) (recordar que cuando el número atómico del medio material aumenta, la dispersión de un electrón con el núcleo atómico es predominante. Por esto, con el fin de disminuir la dispersión, se prefiere el uso de gases de bajo número atómico en el llenado de las cavidades de las cámaras

de ionización (4)).

Hay cámaras que se emplean como patrón de referencia y su uso está restringido a necesidades de calibración. Otras se emplean en trabajos para control de dosis y son de uso regular. Las dimensiones y características dependen de la aplicación a la que están dedicadas. Las cámaras son de volúmenes variados; de forma plana (de paredes paralelas), de forma redonda (de paredes equivalentes al aire) o de forma cilíndrica (tipo dedal). Algunas cámaras son sumergibles y otras cuentan con aditamentos de manera que pueden sumergirse. Las paredes de las cámaras pueden ser de grafito o nylon. En cada caso, la cámara cuenta con un aditamento que se conoce como capuchón de equilibrio electrónico. Este capuchón tiene la función de proporcionar equilibrio electrónico, ya que el capuchón tiene un espesor suficiente para que, al calibrar la cámara en un haz de fotones, se logre que el número, energía y dirección de los electrones incidentes en un volumen específico, producto de la interacción de fotones con la materia, sea el mismo que abandona dicho volumen.

Las características deseadas y las pruebas de aceptación de los instrumentos se describen a continuación (20,25,26,28).

1.-Características deseadas de la cámara de ionización:

- a) Construcción homogénea y volumen fijo.
- b) La perturbación que ofrezca al haz de radiación debe ser lo mínima posible.
- c) Su sensibilidad deberá ser independiente de la energía, de la tasa de dosis, de la polaridad, de su orientación respecto a la dirección del haz y tamaño del mismo, así como del tiempo de uso.
- d) La fuga de corriente deberá ser despreciable en

condiciones de pre y post-irradiación (menor a 5×10^{-14} Amperes en un tiempo de 5 minutos).

• 2.-Pruebas de aceptación para una cámara de ionización:

a) Tomar una radiografía que muestre el estado interior de la cámara.

b) Se debe cuantificar la pérdida de señal por efecto de fuga. Esto se hará midiendo las variaciones en la señal del dosímetro al transcurrir cierto tiempo desde que la cámara se retira de la fuente. Esto se recomienda en pre-irradiación y post-irradiación. El efecto se debe al hecho de que existe pérdida (fuga), al transcurrir el tiempo, de la señal que la cámara integra. La cámara se considera en buenas condiciones si, en cinco minutos después de realizada una medida, la corriente de fuga no es mayor a 0.025 pAmperes.

c) Se debe conocer el efecto de tallo, es decir, la influencia que se produce sobre la señal cuando una porción del cable se expone directamente al haz de radiación. Es deseable que esta influencia sea lo mínima posible.

d) Las medidas deberán ser reproducibles, considerando el tiempo estimado de equilibrio.

e) Se deberá estudiar su sensibilidad a los cambios atmosféricos.

f) Se deberá conocer el efecto de polaridad, es decir, deberá determinarse la razón entre lecturas obtenidas con diferente polaridad, transcurrido el tiempo necesario para que la cámara se estabilice después del cambio de polaridad. El factor por el efecto de polaridad se obtiene midiendo con la polaridad positiva y con la polaridad negativa, bajo las mismas condiciones. El

efecto será despreciable si el factor relativo a las lecturas con diferente polaridad es menor al 0.05 % ; de otra manera se considera que la lectura depende de la polaridad seleccionada y, puesto que no hay razones de preferencia, la dependencia obliga a que se use esta corrección.

g) Determinar la eficiencia en la colección de iones en función del voltaje de polarización indicado por el fabricante. Si se carece de esta información, se hará el estudio necesario para encontrar el voltaje de operación. El factor para el efecto de eficiencia de colección o de saturación se cuantifica por el método de las dos tensiones, que consiste en tomar medidas con voltajes diferentes. Con el cociente de las lecturas obtenidas (M_1/M_2) y la razón de los voltajes (V_1/V_2), se encuentra el valor de P_s a partir de la ecuación cuadrática :

$$P_s = a_0 + a_1 (M_1/M_2) + a_2 (M_1/M_2)^2$$

en donde a_0, a_1 y a_2 se encuentran tabulados (por ejemplo, tabla VIII de la referencia (24) y apéndice C de (10)), en función del cociente entre los voltajes, que se pide sea mayor o igual a dos.

h) Investigar la dependencia de la orientación de la cámara en relación al haz de radiación. Al colocar la cámara perpendicularmente al haz, las lecturas no deben depender de la rotación, respecto al eje longitudinal, que sufra la misma al momento de colocarla; pero es preferible orientarla según lo indicado por el laboratorio que la calibró.

3.-Características deseadas del cable triaxial:

a) Deberá proporcionar, junto con lo dispuesto por el fabricante del dosímetro, una rapidez de equilibrio de menos de un minuto por cambios en el alto voltaje.

b) Debe caracterizarse por una señal baja por radiación inducida en el mismo.

c) Debe caracterizarse por bajo ruido en la señal.

d) El nivel de fuga deberá ser menor a 10^{-14} Amperes.

e) Debe de ser flexible, sin llegar a ser quebradizo.

f) Debe ofrecer facilidad y firmeza al conectarse.

g) Deberá poseer baja capacitancia.

1.6.2 Electrómetro.

El electrómetro es el instrumento de lectura asociado a una cámara de ionización. A él se conecta el cable triaxial. En su funcionamiento sobresale el trabajo de un amplificador operacional retroalimentado de alta ganancia (mayor a 10^4) y alta impedancia (mayor a $10^{12} \Omega$). Debe de ofrecer, de una manera rápida, la cantidad de carga acumulada o corriente acumulada en una variedad de escalas de sensibilidad.

Las características deseadas y las pruebas de aceptación que nos permiten seleccionar un electrómetro se listan a continuación (20,25).

1.-Características deseadas de un electrómetro:

a) Poco tiempo de calentamiento (5-10 min) y rápido equilibrio después de cambios significativos en el alto voltaje (menos de un minuto).

b) Señal de deriva despreciable (menos de 10^{-13} Amperes), en un tiempo aproximado de un minuto, después de ser restablecido a cero.

c) La sensibilidad no debe depender de las condiciones del medio ambiente, del tiempo de uso o de la escala utilizada. Debe ser consistente en los intervalos de medición.

d) Debe ser cómodo para realizar en él cambios de alto voltaje y polaridad.

2.-Pruebas de aceptación para un electrómetro:

a) Verificar que el nivel de voltaje que suministra es el apropiado.

b) El tiempo de equilibrio durante el calentamiento o por cambio de alto voltaje no deberá exceder de diez minutos.

c) Constatar que la corriente de fondo o señal de deriva no exceda los 10^{-14} Amperes.

d) Deberá haber constancia en la sensibilidad de carga en función de la escala.

e) Debe ser consistente en los intervalos de medición.

f) Debe asegurarse que la señal no se vea afectada por absorción dieléctrica en el circuito de retroalimentación del electrómetro.

1.6.3 Fantoma.

Por los efectos que produce la radiación ionizante en cualquier material, es común el empleo de un simulador o fantoma cuya composición sea similar a la del objeto a irradiar o en donde concretamente se quiera conocer la dosis absorbida bajo una exposición controlada.

Así, el fantoma se construye con la forma de un

paralelepípedo recto y se fabrica las más de las veces de un único material, dispuesto de tal manera que en su interior pueda colocarse una o varias cámaras en alguna posición bien conocida. Al interior del fantoma se introduce el material sensible a la radiación cuyas propiedades frente a ésta se desean ensayar.

El fantoma se utiliza para dispersar y absorber la radiación que se hace incidir sobre una de sus caras, más la secundaria generada por aquella, tal como lo haría un cuerpo cuya irradiación no conviene, o que no es capaz de admitir en su interior el detector que se use en la medida del campo de radiación.

Dependiendo de la naturaleza y la energía de la radiación se eligen las dimensiones externas, de manera que desaparezca la influencia de las paredes para que el campo de radiación que se establece en el seno del detector sea todo lo parecido posible al que reinaría en el material que el fantoma substituye y simula. Para ello el fantoma debe tener los parámetros apropiados de interacción con el medio como son el coeficiente de atenuación, el poder de frenado, el coeficiente de absorción, etcétera.

Dentro de una amplia gama de materiales posibles para la función de simulación, el agua resulta ser el mejor simulador de tejido biológico al igual que algunos materiales sintéticos como el poliestireno y la lucita (o perspex). Sin embargo, la dosimetría puede llevarse a cabo en aire cuando no se cuente con algún simulador de los mencionados, pero en este caso será necesario considerar la falta de un medio dispersor tomando en cuenta los factores de corrección al momento del cálculo de la dosis (11.20).

CAPITULO 2

PROTOSCOLOS DE DOSIMETRIA

2.1 INTRODUCCION AL SEGUNDO CAPITULO.

Las prácticas en la radioterapia hoy día requieren que altas dosis de radiación se den con exactitud creciente para que un tratamiento, proporcionado a un paciente con cáncer, sea exitoso. Sin embargo, la calibración de un haz de radiación usado para los tratamientos, con base en la dosimetría, es un método difícil que se ha venido perfeccionando para que aunado a los procedimientos de diagnóstico por imagen, que han aumentado la precisión en la localización de áreas anatómicas que serán irradiadas en el curso de un tratamiento, se minimicen las incertidumbres y de esta forma la precisión en un tratamiento se fortalezca.

Con el fin de evitar ambigüedades y lograr que se realice bajo ciertas pautas la calibración de un haz de radiación por medio de la determinación de la dosis absorbida, diferentes organismos del área de la física médica en el mundo han elaborado sus propias normas y métodos de dosimetría para que sean empleados en los hospitales. Estos métodos han quedado a disposición de la comunidad y se presentan como protocolos de dosimetría (en adelante llamado simplemente protocolo).

Un protocolo es un procedimiento de trabajo riguroso, ordenado y lógico. Para usarlo se necesita conocer su estructura, los prerequisites para ser implementado, los instrumentos con que se debe contar y , principalmente, apego fiel a lo que se indica en cada paso.

Anteriormente muchos de los protocolos fueron empíricos. Actualmente los protocolos se han concebido para la dosimetría de diferentes tipos de radiación (por ejemplo rayos X, radiación gamma de fuentes de Co-60, electrones) y estan basados en análisis teóricos de los conceptos de dosimetría, pero inevitablemente han resultado con diferencias en varios aspectos.

Aunado a lo anterior, cada hospital usa el protocolo que considera más adecuado y fija con él su método de dosimetría pero ha venido ocurriendo que en la intercomparación de los resultados se encuentran discrepancias que no necesariamente se deban al contenido de los protocolos, sino que posiblemente se expliquen a partir de la interpretación y manejo que los usuarios hacen de los mismos.

Por estas razones, se han seleccionado tres protocolos para la dosimetría de electrones en agua, y se pretende dilucidar su contenido e intercomparar los resultados experimentales de la dosis absorbida que se obtiene a energías de los electrones de 7, 10,12, 15 y 18 MeV.

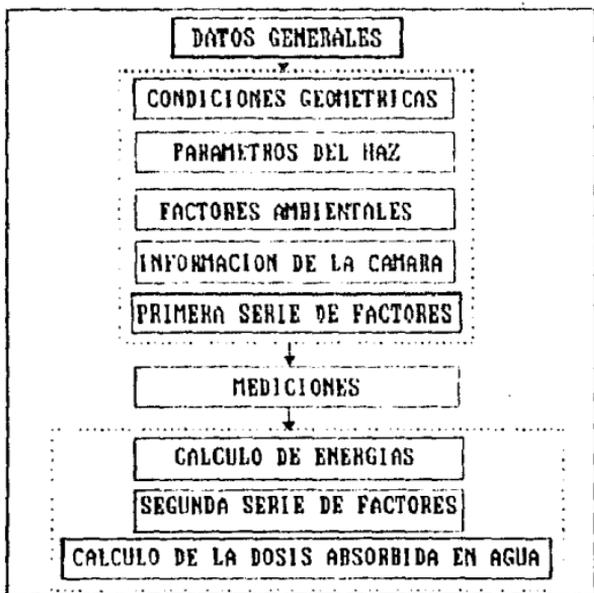
En este capítulo se explicará la estructura general de un protocolo (2.2) y se desglosará el contenido de los tres protocolos seleccionados (2.3), presentando para ello sus respectivas hojas de trabajo (2.3.1), indicando lo común entre los tres (2.3.2) y las diferencias entre ellos (2.3.3). Al final de este capítulo se presenta el resumen de la comparación del contenido de los protocolos (2.4).

2.2 ESTRUCTURA DE UN PROTOCOLO DE DOSIMETRIA.

La dosimetría basada en un protocolo consta de dos partes básicas. La primera es el cálculo del factor de calibración de la cámara, por parte del usuario, a partir de los datos proporcionados por el laboratorio que calibra el equipo de dosimetría.

La segunda, es la parte central del trabajo de dosimetría y consiste en el reporte del trabajo experimental y la elaboración de los cálculos efectuados en una secuencia estándar como la que se muestra en el diagrama de la figura 2.1.

Figura 2.1: Diagrama de la secuencia general para la dosimetría de electrones



El contenido de cada paso de la secuencia es el siguiente.

a) Datos generales: es la información que incluye el nombre del usuario, la fecha y el nombre de la fuente.

b) Condiciones geométricas: incluye las dimensiones del haz, la distancia de la fuente a la superficie del fantoma y la profundidad del punto de medición.

c) Parámetros del haz: es la información de los parámetros d_{max} , d_{50} y R_p , así como la energía nominal de los electrones, el tiempo de exposición en las unidades que mide un monitor adaptado a la fuente (llamadas unidades monitor, denotadas como u.m. o U) y la tasa de exposición o tasa de dosis, respecto al tiempo.

d) Factores ambientales: es la información de los valores de la presión, temperatura y humedad al momento de la calibración y durante las mediciones.

e) Información de la cámara: es la información del tipo de cámara, número de serie, dimensiones y factor de calibración.

f) Primera serie de factores: es la información sobre el factor de corrección por presión y temperatura, el de humedad y otros que se deben considerar bajo la recomendación de cada protocolo

g) Mediciones: es el reporte de las mediciones experimentales (lectura de la cámara) que incluyen las correcciones que proceden de la aplicación de los primeros factores de corrección y que proporcionan la lectura corregida.

h) Cálculo de energías: es la información de la energía media en superficie (\bar{E}_0), de la energía mas probable en superficie ($E_{p,0}$) y de la energía media en profundidad (\bar{E}_z), que se obtienen a partir de los parámetros del haz.

1) Segunda serie de factores: es la información de los valores de los coeficientes de interacción, que se obtienen con los parámetros del haz y las energías.

j) Cálculo de la dosis absorbida en agua: es el resultado de la aplicación de la ecuación para el cálculo de dosis.

Dos precisiones son necesarias. La primera se refiere al sistema de unidades. Para ello existe el consenso de emplear el Sistema Internacional de Unidades (S.I., SI). En segundo lugar, las ecuaciones de dosis se expresan en términos del factor de calibración de la cámara, referida a un haz de Co-60. Esto conduce a resultados referenciables porque el Co-60 es la fuente estándar para la calibración de las cámaras en los laboratorios de calibración.

2.3 CONTENIDO DE LOS TRES PROTOCOLOS DE DOSIMETRIA POR COMPARAR.

Los tres protocolos por comparar pertenecen a lo que se llama la nueva generación de protocolos que son autoconsistentes y basados sobre un análisis teórico de la dosimetría, a diferencia de los que les precedieron que eran protocolos de naturaleza empírica (5). Los tres protocolos fueron elaborados por diferentes grupos del área de la física médica, que los publicaron con los siguientes títulos:

- 1) A PROTOCOL FOR DETERMINATION OF ABSORBED DOSE FROM HIGH ENERGY PHOTON AND ELECTRON BEAMS.
Task Group 21, Radiation Therapy Committee, AMERICAN ASSOCIATION OF PHYSICISTS IN MEDICINE (AAPM).
Medical Physics 10 (6), Nov/Dec 1983.
- 2) ABSORBED DOSE DETERMINATION IN PHOTON AND ELECTRON BEAMS. (An International Code of Practice).
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA).
Technical Reports Series No. 277, 1987.

3) PROCEDIMIENTOS RECOMENDADOS PARA LA DOSIMETRIA DE FOTONES Y ELECTRONES DE ENERGIAS COMPRENDIDAS ENTRE 1 MeV Y 50 MeV, EN RADIOTERAPIA DE HACES EXTERNOS. SOCIEDAD ESPAÑOLA DE FISICA MEDICA (SEFM), 1984.

* La elección de estos tres protocolos para la intercomparación obedece a varias razones. De las más importantes por mencionar son el que el primero (AAPM) y el tercero (SEFM) se publicaron en fechas cercanas entre sí, pero con diferencias conceptuales. Esto por ejemplo, queda establecido en el protocolo de la SEFM al mencionar que el protocolo

"muestra la presencia de una cierta línea docente en aspectos concretos, como dosimetría teórica, factores de corrección y medios instrumentales... y ... en la comparación con otros protocolos y publicaciones, el lector debe poner especial atención en la simbología y significado de cada factor pues desgraciadamente no existe uniformidad al respecto, y se dan casos de factores iguales con distintas nomenclaturas y de símbolos similares conceptualmente distintos"(10).

Por su parte la AAPM integra los nuevos conceptos que hasta esa fecha habían surgido y su propósito es

"describir métodos y proveer datos que permitan determinar la dosis absorbida con más precisión que de lo hasta ahora posible"(24).

Por otro lado, el protocolo Internacional de la IAEA aparece en 1987 con el propósito de

"describir detalladamente los métodos del procedimiento y proporcionar los mejores valores para los coeficientes de interacción física y para los factores de corrección que permitirán, con la exactitud esperada, determinar la dosis absorbida... y ...ayudará a conseguir en todo el mundo un nivel aceptable de uniformidad en la administración de la dosis de radiación"(23).

por lo que el protocolo hace una amplia y sencilla exposición de todos los conceptos actuales de la dosimetría y en él se incluye una exhaustiva lista de la instrumentación conocida hasta la fecha. El protocolo menciona que

"ha utilizado información existente en los protocolos nacionales actuales y se intenta brindar al usuario un documento que sea claro e inteligible y fácil de seguir en diferentes circunstancias de uso"(23).

2.3.1 HOJAS DE TRABAJO DE LOS TRES PROTOCOLOS, PARA LA DOSIMETRIA DE ELECTRONES.

Para la elaboración de las hojas de trabajo que se van a analizar en este capítulo se ha tomado la idea de las hojas de ejemplo que cada protocolo incluye. Con la finalidad de facilitar la comparación de los tres protocolos, se considera en las hojas sólo lo referente a medidas en un fantoma de agua, lo que conduce a la determinación de la dosis en agua. Por esta razón, fué conveniente hacer cambios a las hojas originales. Esto no afecta el contenido original de cada hoja, en lo que se refiere a medidas en agua; únicamente se modificó la presentación de las mismas para hacer más sencilla la comparación.

Los tres protocolos coinciden en recomendar el uso de la cámara de ionización, pues hasta hoy es universalmente aceptada por su precisión, confiabilidad y asequibilidad, demostradas durante más de cincuenta años de extensa experiencia (5).

Para la simulación

"se recomienda el agua como medio de referencia para medidas de dosis absorbidas en haces de fotones y electrones" (C) § 6.1, pág. 20 de (10) y § 3.2, pág. 14 de (23)),

porque la determinación de la dosis se debe referir siempre al agua ya que el agua es uno de los mejores simuladores equivalente a tejido y fácilmente asequible;

"por consiguiente, medidas para la determinación de la dosis, al menos en haces de electrones, deben siempre hacerse en agua o plásticos conductores" (C10) y § v de (24)).

Sin duda los tres protocolos incluyen los aspectos indicados en el apartado 2.2 de éste capítulo, pero en los tres existen semejanzas y diferencias de contenido. Las semejanzas forman un tronco común, salvo discrepancias en nombre, notación o información complementaria. Las diferencias se encuentran propiamente en algunos conceptos y factores que se incluyen en el

cálculo del factor de calibración de la cámara y en los factores para el cálculo de la dosis.

Las hojas de trabajo aparecen en las páginas siguientes. Para una rápida identificación de las componentes en un protocolo, con sus correspondientes o equivalentes en otro, se les ha asignado a estas un número entre corchetes. El protocolo de la AAPM ha sido tomado como referencia, es decir, cada componente de los otros dos protocolos que no esté incluido, que no tenga equivalente en el de la AAPM o que necesite de una explicación particular, ha sido marcado con un asterisco. Se previene a los lectores no familiarizados para que localicen las componentes en las hojas en lugares que quizás no guarden el mismo orden.

Para los lectores interesados en la manera de efectuar los cálculos del factor de calibración de la cámara, se recomienda que consulten los protocolos originales, en donde aparecen ejemplos para la obtención de dicho factor.

2.3.2 CONTENIDO COMUN DE LOS TRES PROTOCOLOS.

Al terminar la dosimetría se recomienda que un equipo de físicos, mínimamente dos, revisen el trabajo que se ha realizado. Por ello es muy importante anotar el nombre del físico que hizo la dosimetría (1).

Generalmente en un centro hospitalario hay más de una fuente y como parte de la labor del físico es realizar periódicamente la dosimetría en ellas, para evitar confusión, es necesario anotar la fecha de elaboración de la dosimetría (2). También se debe anotar el nombre de la fuente (3) en la que, desde la construcción, el fabricante establece la energía nominal del haz de electrones (4) a la salida del acelerador.

HOJA DE TRABAJO PARA EL CALCULO DE DOSIS EN AGUA PARA HACES DE ELECTRONES, SEGUN LA AAPM

DATOS GENERALES

Nombre: _____ [1] Fecha: _____ [2]

Fuente de radiación: _____ [3] Energía nominal: _____ [4] MeV

GEOMETRIA

Material del fantoma (med): _____ * SSD: _____ [5] cm

Tamaño de campo del colimador: _____ [6] cm²

Profundidad de medida : _____ [7] cm

PARAMETROS DEL HAZ

dso: _____ [8] cm de agua. Energía media incidente (\bar{E}_0): _____ [9] MeV

donde $\bar{E}_0 = 2.99 \times dso$. Alcance práctico (R_p): _____ [10] cm

Energía media a la profundidad de medida $\bar{E}_z = \bar{E}_0(1 - (z/R_p))$:

$\bar{E}_z =$ _____ [11] MeV

ECUACION DE DOSIS POR UNIDAD MONITOR :

$$D_{water}/U = (M/U) \cdot N_{gas} \cdot (L/\rho)_{air}^{water} \cdot P_{ion} \cdot Prepl$$

donde U se refiere a las unidades monitor del acelerador.

FACTORES AMBIENTALES

Temperatura $T =$ _____ [12] °C y Presión $P =$ _____ [13] mmHg en el momento de las mediciones. La señal M de la cámara es normalizada a 22°C y una atmósfera de Presión, usando el factor:

$$\frac{(T + 273^\circ C)}{295^\circ C} \times \frac{760 \text{ mmHg}}{P} = \text{_____} [14]$$

Promedio de la señal de la cámara por unidad monitor (con el mayor potencial colector), incluyendo la corrección ambiental:

$(M/U) =$ _____ [15] Coulomb/U

o $(M/U) =$ _____ [15] div. escala/U

CARACTERISTICAS DE LA CAMARA DE IONIZACION

Modelo de la cámara: [16] diámetro interno: [17] mm

Factor de calibración para el gas de la cámara :

$$N_{\text{gas}} = \frac{M}{\rho} \text{ Gy/Coulomb}$$

FACTORES DE CORRECCION

Razón de poderes de frenado en profundidad para \bar{E}_0 :

$$\text{Tabla V.} \dots \dots \frac{\bar{L}_{\text{water}}}{\bar{L}_{\text{air}}} = [18]$$

Factor de corrección por recombinación de iones:

$$\text{Fig. 4.} \dots \dots \dots P_{\text{ion}} = [19]$$

Factor de corrección por reemplazamiento:

$$\text{Tabla VIII.} \dots \dots \dots P_{\text{repl}} = [20]$$

DOSIS EN AGUA POR UNIDAD MONITOR EN d_{max} :

$$D_{\text{water}}(d_{\text{max}})/U = \dots \dots \dots \text{Gy/U}$$

HOJA DE TRABAJO PARA EL CÁLCULO DE DOSIS EN AGUA PARA HACES DE ELECTRONES, SEGUN LA IAEA

DATOS GENERALES

Nombre: _____ [1] Fecha: _____ [2]

Unidad de radioterapia: _____ [3] Energía Nominal: _____ [4] MeV

GEOMETRIA

Profundidad del punto efectivo de medida:

($Z_{p\text{eff}} - Z_p = 0.5 r$): _____ [7] cm

Tamaño de campo: _____ [8] cm^2 a SSD= _____ [5] cm

Tasa de dosis nominal del acelerador: _____ * unidades monitor/mín

CARACTERISTICAS DE LA CAMARA DE IONIZACION

Modelo y número de serie: _____ [16]

Radio interno: _____ [17] mm

Material de la pared y espesor: _____ * , _____ * g/cm^2

Factor de dosis absorbida para el aire de la cámara:

$N_D =$ _____ * Gy/div

o $N_D =$ _____ * Gy/C , dado a $P_0 =$ _____ kPa, $T_0 =$ _____ °C y _____ %

de humedad relativa (HR).

Voltaje de polarización: _____ * Vdc

Cambio en la respuesta, comparada con la de la fecha de calibración, derivado con una fuente radiactiva: _____ *

Corrección de la lectura del electrómetro:

Valor promedio de las lecturas corregidas por fuga y polaridad:

$M_u =$ _____ * div/u.m.

o $M_u =$ _____ * C/u.m.; unidades monitor: _____ * u.m.

FACTORES AMBIENTALES

Presión, $P =$ [13] kPa Temperatura, $T =$ [12] °C

$$P_{TP} = \frac{P_0 (273.2 + T)}{P (273.2 + T_0)} = \text{_____} = \text{[14]}$$

Corrección humedad: $K_h =$ _____ *

Corrección por recombinación:

$V_1 =$ _____ Vdc $V_2 =$ _____ Vdc $M_1/M_2 =$ _____ *

{ $a_0 =$ _____, $a_1 =$ _____, $a_2 =$ _____ de tabla VIII} $P_S =$ [19]

$M_u = M_u \cdot P_{TP} \cdot K_h \cdot P_S =$ [15] div/u.m. o _____ C/u.m.

PARAMETROS DEL HAZ

Alcances obtenidos por medidas a $SSD =$ [5] cm con curvas de dosis absorbida o de ionización en profundidad a $SSD = 1m$.

$R_{50} =$ [8] cm $R_p =$ [10] cm

Material del fantoma: _____ *

Energía más probable en la superficie:

$E_{p,0} = 0.22 + 1.98 R_p + 0.0025 R_p^2$ $E_{p,0} =$ _____ MeV

Energía media en la superficie, tabla IV: $\bar{E}_0 =$ [9] MeV

$z/R_p =$ _____ * Tabla V: $\bar{E}_z/\bar{E}_0 =$ _____ *

Energía media a profundidad ($z =$ _____ cm): $\bar{E}_z =$ [11] MeV

FACTORES DE CORRECCION

Razón de poderes de frenado agua/aire: Tabla X... $S_{v,air} =$ [18]

Factor de perturbación: Tabla XI..... $P_u =$ [20]

Factor por el efecto del electrodo central $P_{cel} =$ _____ *

ECUACION DE DOSIS

$D_{waterCPerf} = M_u \cdot N_D \cdot S_{v,air} \cdot P_u \cdot P_{cel} =$ _____ Gy/U

HOJA DE TRABAJO PARA EL CALCULO DE DOSIS EN AGUA PARA HACES DE ELECTRONES, SEGUN LA SEFM

DATOS GENERALES

Físico responsable: _____ [1] Fecha: _____ [2]

Unidad de radiación: _____ [3] Energía Nominal: _____ [4] MeV

GEOMETRIA

Profundidad en agua del punto de calibración (z): _____ [7] cm

Profundidad del punto de referencia de la cámara: _____ * cm

Tamaño de campo: _____ [8] cm² a DFS= _____ [5] cm

Tasa nominal de dosis del acelerador: _____ * u. m. /min

DATOS DE LA CAMARA DE IONIZACION:

Modelo: _____ [16] número de serie: _____ [16]

Radio interno: _____ [17] cm Espesor de la pared: _____ * g/cm²

Factor de dosis absorbida en el aire de la cavidad:

N_D = _____ * Gy/div.

o N_D = _____ * Gy/C

establecido a: P₀ = _____ P₀ mbar, T₀ = _____ T₀ °C y _____ * %HR

Tensión de colección: _____ * Vdc

Lecturas con fuente de comprobación de *estabilidad, respecto a la fecha de calibración: _____

Lectura corregida del electrómetro, M_u = _____ * div/u. m.

o M_u = _____ * C/u. m.

unidades monitor = _____ * u. m.

FACTORES AMBIENTALES

Temperatura θ = _____ [12] °C Presión P = _____ [13] mbar

$f(P, \theta) = \frac{1013}{P} \cdot \frac{273.2 + \theta}{295.2} = \text{_____} [14]$

Factor de corrección por humedad: $K_h = \frac{*}{*}$

Corrección por saturación:

$CK_{at}D_u = \frac{*}{*}$

$V_1 = \frac{*}{*} V_{dc}$ $V_2 = \frac{*}{*} V_{dc}$ $M_1/M_2 = \frac{*}{*}$

Lectura corregida:

Figura C.2a , p. 58 $(K_a)u = \frac{[19]}{*}$

$M_u^* = M_u \cdot \rho(P, \theta) \cdot K_h \cdot (CK_{at}D_u) \cdot (K_a)u = \frac{[15]}{*} \text{ div/u. m.}$

o $M_u^* = \frac{[15]}{*} \text{ C/u. m.}$

PARAMETROS DEL HAZ

Alcances a partir de medidas a DFS = 1 m sobre curvas de :
ionización o dosis absorbida

$R_{50} = \frac{[8]}{*} \text{ cm}$

$R_p = \frac{[10]}{*} \text{ cm}$

Material del fantoma utilizado: $\frac{*}{*}$

Energía más probable en superficie:

$$E_{p,0} = 0.22 + 1.98 \cdot R_p + 0.0025 \cdot R_p^2$$

$E_{p,0} = \frac{*}{*} \text{ MeV}$

Energía media en superficie, tabla 5.2 : $\bar{E}_0 = \frac{[9]}{*} \text{ MeV}$

$z/R_p = \frac{*}{*}$ Tabla 5.3: $\bar{E}_z/\bar{E}_0 = \frac{*}{*}$

Energía media en profundidad ($z = \frac{*}{*} \text{ cm}$) :

$\bar{E}_z = [\bar{E}_z/\bar{E}_0] \cdot \bar{E}_0$ $\bar{E}_z = \frac{[11]}{*} \text{ MeV}$

FACTORES DE CORRECCION

Razón de poderes de frenado agua/aire, tabla 6.3 (actualizada
en el suplemento de este protocolo (98)) $S_{w,air} = \frac{[18]}{*}$

Factor de perturbación por fluencia, tabla 6.4: $P_f = \frac{[20]}{*}$

Factor de corrección por desplazamiento: $P_d = \frac{*}{*}$

Factor de perturbación por pared: $P_{wall} = \frac{*}{*}$

Factor de corrección por efecto del electrodo: $P_{eel} = \frac{*}{*}$

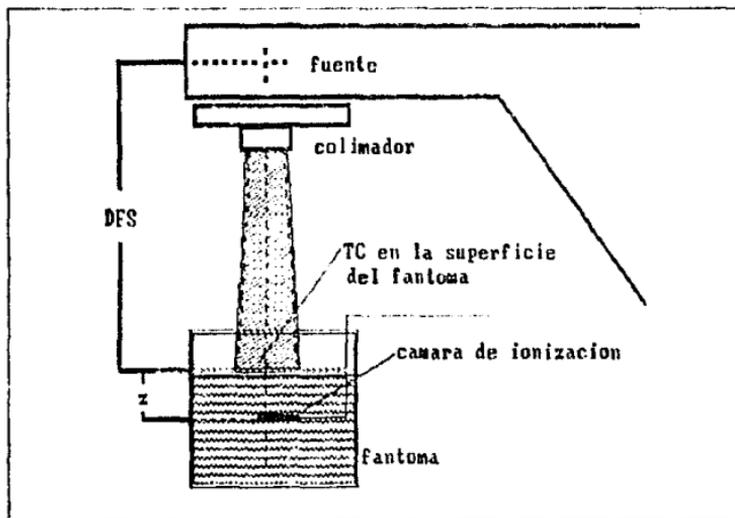
ECUACION DE DOSIS:

$D_v = M_u^* \cdot N_D \cdot S_{w,air} \cdot P_f \cdot P_d \cdot P_{wall} \cdot P_{eel} = \frac{*}{*} \text{ Gy/u. m.}$

Las condiciones geométricas importantes para la dosimetría son: la distancia a la superficie del fantoma desde la fuente (5) (Source Surface Distance (SSD), para la AAPM y la IAEA, o Distancia Fuente Superficie (DFS para la SEFM), el tamaño de campo o dimensiones del colimador (6) y la profundidad en el fantoma z, donde se realizará la medición (7). Estas condiciones de la geometría se ilustran en la figura 2.2 .

Aunque el protocolo de la AAPM no considera necesario especificar la tasa de dosis de la fuente (en U/min), con las actuales tecnologías hay fuentes que permiten seleccionar entre por lo menos dos. Si bien, ningún resultado depende de esta selección, la IAEA y la SEFM sugieren que se anote.

Figura 2.2: Condiciones geométricas importantes para la dosimetría. DFS=Distancia fuente-superficie, TC=Tamaño de campo y z=profundidad del punto de medida desde la superficie del fantoma.



De las curvas experimentales de porcentaje de ionización en profundidad (o de las curvas de dosis en profundidad), se consiguen los valores de la profundidad del máximo relativo de ionización (d_{max}), la profundidad correspondiente al cincuenta por ciento de ionización (d_{50} o R_{50} según la SEFM y la IAEA [8]), y el alcance práctico R_p [10]. d_{max} es la profundidad del punto de calibración en la dosimetría de electrones (ver más adelante). d_{50} y R_p se obtienen directamente de la curva de ionización en profundidad, como se menciona en el apartado 1.4.

Se deben anotar las condiciones ambientales reinantes al momento de medir: la presión P [13] y la temperatura T [12], pues es posible que no coincidan con las condiciones ambientales que se reportan durante la calibración de la cámara (P_0 y T_0). La humedad relativa (H.R.) es también un parámetro ambiental importante. Aunque más adelante se incluye una descripción concerniente a la influencia de la humedad, basta mencionar aquí que la IAEA y la SEFM consideran conveniente anotar el valor relativo de ésta durante la dosimetría.

Con los valores de las lecturas ambientales de la presión P y la temperatura T , y los valores conocidos de P_0 y T_0 , se calcula el factor de corrección por presión y temperatura [14], con las ecuaciones que aparecen en la tabla 2.1 (las unidades para la presión son, respectivamente: mmHg, kPa y mbar).

Tabla 2.1: Ecuaciones del factor de corrección por presión y Temperatura, para cada protocolo.

	$(T + 273 \text{ } ^\circ\text{C}) / 760\text{mmHg}$	
	$295 \text{ } ^\circ\text{C}$	P
		AAPM
$P_{TP} =$	$\frac{P_0 (273.2 + T)}{P (273.2 + T_0)}$	IAEA
$p(P, \theta) =$	$\frac{1013 (273.2 + \theta)}{P \quad 295.2}$	SEFM

Respecto a la instrumentación, y en el caso en que se emplea una cámara cilíndrica, se deben anotar de la cámara el modelo y número de serie [16], su radio interno [17] tomado desde el electrodo central a la superficie interna (la AAPM sugiere medir el diámetro interno y esto no tiene ninguna consecuencia importante).

Los tres protocolos incluyen tablas con los valores de los factores de la razón de poderes de frenado másico restringido (o simplemente razón de poderes de frenado) agua/aire [18], para aire seco. Los valores reportados coinciden, siendo la notación la única diferencia, como se aprecia en la tabla 2.2.

Es importante mencionar que la SEFM publicó, en el suplemento a su protocolo (9a), los valores actualizados de $S_{w,air}$.

Tabla 2.2: Notación de la razón de poderes de frenado agua/aire, para cada protocolo.

AAPM	IAEA y SEFM
$\frac{W_{water}}{(L/\rho)_{air}}$	$S_{w,air}$

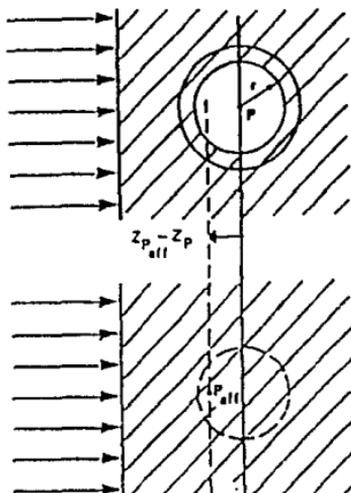
Los factores P_{ion} , P_s y $(Ks)_u$ [19] (el subíndice u hace énfasis en que el proceso de calibración es por parte del usuario) representan la corrección por recombinación, para la AAPM, la IAEA y la SEFM, respectivamente. Este factor toma en cuenta el nivel de saturación de la cámara por la recombinación de iones en el gas de la cámara.

Cuando se realiza la dosimetría de electrones con un fantoma de agua y una cámara de ionización cilíndrica llena de aire, se tienen dos efectos por el reemplazamiento que de un volumen de agua hace la cámara. El primer efecto es el cambio que se produce en la fluencia. El segundo es el cambio en la posición del punto donde se desea conocer la dosis absorbida.

Los cambios en la fluencia se corrigen con el factor de corrección por reemplazamiento Pr_{ref} [20] en la AAPM y sus equivalentes P_u (factor de perturbación) en la IAEA y P_r (factor de perturbación por fluencia) en la SEFM.

Los cambios en la posición se corrigen con la corrección por punto efectivo de medida. Para esto es necesario colocar la cámara a una profundidad tal que el efecto de desplazamiento sea corregido. Por ejemplo, cuando el punto en donde se quiere medir tiene una profundidad z en el agua (en ausencia de la cámara) entonces, para realizar la dosimetría en ese punto, se tiene que colocar la cámara a la profundidad $z+u$. Así, las mediciones van a ser efectivas en z tal y como sucedería si la cámara no estuviera presente. Por lo tanto, una vez establecido el punto de calibración (z_{max}), la profundidad de medición a la que deberá colocarse la cámara (tomando como referencia el centro de la

Figura 2.3: Posición del punto efectivo de medida.



La figura muestra las posiciones del punto efectivo de medida y del punto de referencia en la cavidad de la cámara. La distancia del punto efectivo al centro de la cámara es $(z_{\text{peff}} - z_p)$. (fig.11. pág. 38 (29))

misma) será la del punto de calibración, que deberá corregirse por el punto efectivo de medida.

La figura 2.3 ilustra la localización del punto efectivo de medida, y las recomendaciones de cada protocolo sobre las profundidades del punto de calibración, de medición y de la corrección por el punto efectivo de medida se indican en la tabla 2.3.

Tabla 2.3: Profundidad del punto de calibración, de la profundidad de medición y del punto efectivo de medida, para cada protocolo.

AAPM

Punto de calibración (para cualquier energía): d_{max} .

Profundidad de medición (z): la correspondiente a d_{max} .

Profundidad del punto efectivo de medida de la cámara* (sólo para determinar d_{max} , d_{50} y R_p): a $0.75r$ de z en dirección a la fuente.

IAEA y SEFM

Punto de calibración (para cualquier energía): d_{max} .

Profundidad de medición (z_p): colocando el centro de la cámara (electrodo central) en la profundidad correspondiente a d_{max} .

Profundidad del punto efectivo de medida (z_{poff}): a $0.5r$ de z_p en dirección a la fuente.

* Sólo para la obtención de las curvas de ionización en profundidad (ver fig. 6, pdg. 757 de (10)).

Las ecuaciones resultantes para el cálculo de dosis aparecen en la tabla 2.4, donde se puede apreciar que los factores son multiplicativos y entre las ecuaciones hay diferencias importantes de notación.

Tabla 2.4: Ecuaciones para el cálculo de dosis, para cada protocolo.

$D_{water}(d_{max})/U =$	$\frac{D_{water}}{(M/U) \cdot N_{gas} \cdot (L/\rho)_{air} \cdot P_{ion} \cdot P_{repl}}$	(ay/U)	AAPM
$D_{CPOff} =$	$M_u \cdot N_b \cdot S_{w,air} \cdot P_u \cdot P_{cal}$	(ay/U)	IAEA
$D_v =$	$M_u \cdot N_b \cdot S_{w,air} \cdot P_l \cdot P_d \cdot P_{vall} \cdot P_{cal}$	(ay/U)	SEFM

A continuación se explica lo relacionado a las semejanzas entre los protocolos, para el cálculo del factor de calibración de la cámara.

El medio donde se conoce la dosis en el momento de la calibración de la cámara, es aquel que llena la cavidad. En el protocolo de la AAPM el factor de calibración es N_{gas} y en los protocolos de la SEFM y IAEA el factor es N_b , en unidades de Gy/C. El factor de calibración de dosis en el gas que llena la cavidad (aire) se relaciona con el factor de calibración de exposición N_x (actualmente se recomienda el uso del factor de kerma en aire N_k en vez del factor N_x , pero en este trabajo se prefiere el uso de este último, recordando que ambos están relacionados por un simple factor de conversión). El factor N_x viene reportado en un certificado de calibración del laboratorio calificado (Accredited Dosimetry Calibration Laboratory o ADCL). El ADCL indica las condiciones bajo las que se hizo la calibración: condiciones ambientales de presión y temperatura, tamaño de campo, distancia desde la fuente a la cámara, orientación, voltaje de polarización, la carga colectada y la tasa de exposición con la fuente de Co-60. Se incluye, para cualquier referencia posterior, la información de la cámara de ionización: fabricante, modelo, volumen nominal, número de serie y material del capuchón de equilibrio electrónico. Para el electrómetro la información incluye el nombre del fabricante, el modelo, el número de serie y la escala, el intervalo y la polaridad utilizada en la calibración.

Las ecuaciones para el cálculo del factor de calibración, para cada protocolo, aparecen en la tabla 2.5. Aunque no es evidente de estas ecuaciones, los tres protocolos emplean el factor $K=2.58 \times 10^{-4} \text{ Ckg}^{-1} \text{ R}^{-1}$, para convertir la exposición a unidades de Röentgen.

Tabla 2.5: Ecuaciones para el cálculo del factor de calibración, para cada protocolo.

AAPM(24,97,99)

$$N_{\text{gas}} = \frac{N_x \cdot K \cdot (W/e)_{\text{air}} \cdot A_{\text{ion}} \cdot A_{\text{vall}}}{\alpha \cdot \overline{(L/\rho)}_{\text{air}}^{\text{vall}} \cdot \overline{(\mu_{\text{en}}/\rho)}_{\text{air}} + (1-\alpha) \cdot \overline{(L/\rho)}_{\text{air}}^{\text{cap}} \cdot \overline{(\mu_{\text{en}}/\rho)}_{\text{cap}}}$$

IAEA

$$N_D = N_x \cdot (W/e) \cdot k_{\text{att}} \cdot k_{\text{m}}$$

donde:

$$K_{\text{m}} = \alpha \cdot S_{\text{air, vall}} \cdot \overline{(\mu_{\text{en}}/\rho)}_{\text{vall, air}} + (1-\alpha) \cdot S_{\text{air, cap}} \cdot \overline{(\mu_{\text{en}}/\rho)}_{\text{cap, air}}$$

SEFMC(10,90)

$$N_D = \{N_x \cdot (W/e) \cdot k_{\text{m}} \cdot k_{\text{as}}\} / \{(k_{\text{sc}})_{\text{c}} \cdot (k_{\text{st}})_{\text{c}}\}$$

donde:

$$K_{\text{m}} = \alpha \cdot S_{\text{air, vall}} \cdot \overline{(\mu_{\text{en}}/\rho)}_{\text{vall, air}} + (1-\alpha) \cdot S_{\text{air, cap}} \cdot \overline{(\mu_{\text{en}}/\rho)}_{\text{cap, air}}$$

En la tabla 2.6 se presentan los valores más recientemente aceptados de la energía consumida para formar un par de iones

(W/e), hipotéticamente invariable en el intervalo de energías de hasta 50 MeV (para la definición de W/e, ver página 40 de este trabajo). En el caso de la AAPM esto se discute ampliamente en dos artículos, en los que se clarifica que el protocolo original de la AAPM omitió especificar que el valor corresponde a aire seco (97,99,40,41).

Tabla 2.6: Energía media consumida para formar un par de iones por unidad de carga, para cada protocolo.

AAPM	(W/e) _{air} =33.97 J/C ; aire seco
IAEA y SEFM (90)	W/e=33.97 J/C ; aire seco

El factor que corrige la atenuación y dispersión en la pared de la cámara y en el capuchón de equilibrio electrónico, por la exposición de la cámara a Co-60, es denominado A_{wall} por la AAPM (antes A_{wall} (97,99)):

$$A_{wall} = C A_{wall} \cdot \beta_{wall} \quad , \quad \text{donde } A_{wall} = (1 - (\gamma \cdot t / 100))$$

con t el espesor de la pared de la cámara más el capuchón, en $g \cdot cm^{-2}$, γ el factor de atenuación y dispersión del espesor total, en $cm^2 \cdot g^{-1}$, y β_{wall} el factor que toma en cuenta la dosis absorbida debida al transporte de energía por los electrones, después de la colisión con la pared de la cámara.

Es importante señalar que los valores que deberán usarse para A_{wall} son los de la tabla III de la página 740 del protocolo de la AAPM, que ya incluyen el factor β_{wall} (97,99).

El factor equivalente a A_{wall} en los protocolos de la IAEA y la SEFM son k_{att} y k_{as} , respectivamente, y se calculan con la ecuación:

$$k_{att} = k_{as} = (1 - (\gamma \cdot X_t))$$

donde X_t equivale a la t de la ecuación de A_{wall} .

El factor α cuantifica la fracción de ionización debida a los electrones provenientes de la pared de la cámara. El factor complementario $(1-\alpha)$ mide la cantidad de ionización debida a los electrones originados en el capuchón de equilibrio electrónico (denotado por cap).

2.3.3 DIFERENCIAS DE CONTENIDO DE LOS TRES PROTOCOLOS.

En los tres protocolos, la lectura promedio M para la AAPM, M_{IAEA} para la IAEA y M_{SEFM} para la SEFM se reporta en Coulomb por unidad monitor (C/U), o en escala de división por unidad monitor (div/U) para el caso en que el electrometro tenga divisiones de escala diferentes a las de carga eléctrica. Complementario a esto, los protocolos de la IAEA y la SEFM recomiendan que se incluya la corrección por fuga en la cámara y la corrección por polaridad cuando, por los resultados de las pruebas de verificación del equipo, se ameriten.

El factor de corrección debido a la humedad K_h se considera con valor unitario siempre que se compruebe que el nivel de humedad, durante las mediciones, se encuentre entre el 15% y el 70% en el intervalo de temperatura de 15°C a 25°C (página 45 de (10) y página 804 de (11)). De lo contrario deberá tomarse en cuenta haciéndolo explícito en las ecuaciones de lectura corregida (15) de la IAEA y la SEFM.

Con la multiplicación de estos factores por la lectura de la cámara se obtiene la ecuación de la lectura corregida (15) que, para cada protocolo, aparece en la tabla 2.7.

La diferencia entre las ecuaciones de lectura corregida son: la inclusión de los factores de corrección por el efecto de tallo (K_{aD}) y el factor por efecto de humedad K_h , incluidos en la SEFM, y el factor de corrección por humedad k_h , incluido en la IAEA

Tabla 2.7: Ecuaciones de lectura corregida, para cada protocolo.

AAPM	IAEA	SEFM
$\overline{CM \cdot UD} = M \cdot f$	$M_u = M_u^0 \cdot P_{TP} \cdot K_h \cdot P_s$	$M_u = M_u^0 \cdot \psi \cdot P, \theta \cdot K_h \cdot (K_{at} \cdot D_u \cdot (K_{e})_u)$

f equivale al factor de corrección por presión y temperatura de los otros protocolos.

(sobre $P_s, (K_e)_u$ y el equivalente P_{ion} de la AAPM se habló en el apartado anterior).

Respecto al cálculo de las energías, para la AAPM $\overline{E_0}$ [9] debe calcularse con la ecuación: $\overline{E_0} = 2.33 \cdot d_{50}$, válida para tamaños de campo grande (tamaño de campo mayor que aquél para el cual no se incrementa la profundidad d_{50}), y d_{50} obtenido en curvas de ionización o de dosis en profundidad (la diferencia entre ambas curvas no es mayor al 0.5%, en el intervalo de hasta 25 MeV).

Para encontrar el valor de $\overline{E_0}$, la IAEA y la SEFM proponen el uso de los valores que aparecen en las tablas que cada protocolo ha incluido (tabla IV y 5.2 respectivamente), cuando R_{50} se obtiene de una curva de ionización o de dosis en profundidad, tomadas a una distancia fuente superficie de un metro y tamaños de campo superiores a los 12 cm^2 *.

La energía media en profundidad $\overline{E_z}$ [11] se obtiene normalmente de la ecuación que relaciona a ésta con $\overline{E_0}$: $\overline{E_z} \approx \overline{E_0} \cdot (1 - z/R_p)$, con z la profundidad de medida y R_p el alcance práctico, como se menciona en la AAPM. Sin embargo, los protocolos de la IAEA y de la SEFM hablan del uso más apropiado de la ecuación de Harder: $\overline{E_z} \approx E_{p,0} \cdot (1 - z/R_p)$ para energías menores a los 10 Mev o pequeñas profundidades a energías superiores, donde $E_{p,0}$ es la energía más probable en superficie del fantoma.

* El tamaño de campo recomendado no es definitivo pues se aceptan resultados con tamaños de 10 cm^2 , que en la actualidad es el tamaño de campo más frecuentemente usado.

obtenida con la ecuación:

$$E_{p,0} = 0.22 + 1.06R_p + 0.0025R_p^2$$

con el alcance práctico R_p , medido en una curva de ionización en profundidad.

Para encontrar el valor de \bar{E}_z , la IAEA y la SEFM proponen el uso de los valores de las tablas que cada protocolo presenta (tabla V y 5.3 respectivamente), válidos para cualquier haz clínico y fantasmas de agua (página 27 de (10), página 18 de (29) y referencia (22)). Los datos de entrada de estas tablas son \bar{E}_0 y el cociente Z/R_p .

Otros dos factores, incluidos sólo por el protocolo de la SEFM, son P_d y P_{wall} (el valor de P_{wall} , para el caso de electrones, es discutido por la AAPM, ecuación 10, página 751). El primero se debe usar sólo cuando las mediciones no tomen en cuenta el punto efectivo. Aunque en este trabajo P_d no será considerado, se menciona a fin de presentar la ecuación de dosis original. El factor P_{wall} es unitario para electrones.

El factor $P_{cat}=1.008$, es considerado por el protocolo de la IAEA y por la SEFM en su suplemento (§4.2 (a)). El factor se incluye considerando que el electrodo central es de un material no equivalente al aire (para el caso de electrodos de aluminio consultar la tabla XIX de la página 65 de la IAEA).

Respecto a las diferencias en el cálculo del factor de calibración, se tiene lo siguiente.

Los factores de la razón de los poderes de frenado másico restringido, aire/pared y aire/cap, permiten la corrección por la no equivalencia al aire del material de la cámara y el capuchón. Para cada protocolo el concepto es equivalente, pero difieren en la notación y valor reportado. La tabla 2.8 presenta la notación de estos coeficientes, para cada protocolo.

Tabla 2.8: Factores de la razón de poderes de frenado pared/aire y cap/aire, para cada protocolo.

AAPM	IAEA y SEFM
$\overline{v_{all}}_{(L/\rho)_{air}}$	$S_{air,vall}$
$\overline{cap}_{(L/\rho)_{air}}$	$S_{air,cap}$

Cada protocolo incluye el uso de los factores de la razón de coeficientes máxicos de absorción de energía pared/aire y cap/aire. Cel lector interesado en la definición de estos coeficientes de interacción de un material, para partículas ionizantes sin carga, puede remitirse a la referencia (13)). En los tres protocolos el concepto es el mismo pero difieren en la notación y valor reportado. La tabla 2.9 presenta la notación de estos coeficientes, para cada protocolo.

Tabla 2.9: Factor de la razón de los coeficientes máxicos de absorción de energía aire/pared y aire/cap, para cada protocolo.

AAPM	IAEA y SEFM
$\overline{(\mu_{en}/\rho)_{air}}_{vall}$	$\overline{(\mu_{en}/\rho)_{vall,air}}$
$\overline{(\mu_{en}/\rho)_{air}}_{cap}$	$\overline{(\mu_{en}/\rho)_{cap,air}}$

El factor de corrección por la no equivalencia al aire del material de la cámara más el capuchón de equilibrio, en la energía de Co-60, se determina con el producto de los dos últimos factores, combinados con α y $(1-\alpha)$, como se presentan en la tabla 2.10 .

Tabla 2.10: Factores de corrección por la no equivalencia al aire de los materiales de la cámara más el capuchón, para cada protocolo.

$$\text{AAPM} \quad \alpha \cdot \frac{\overline{L/\rho}^{\text{vall}}}{\text{air}} \cdot \frac{\overline{\mu_{\text{en}}/\rho}^{\text{air}}}{\text{vall}} + (1-\alpha) \cdot \frac{\overline{L/\rho}^{\text{cap}}}{\text{air}} \cdot \frac{\overline{\mu_{\text{en}}/\rho}^{\text{air}}}{\text{cap}}$$

IAEA

$$Y \quad K_m = \alpha \cdot S_{\text{air, vall}} \cdot \frac{\overline{\mu_{\text{en}}/\rho}^{\text{vall, air}}}{\text{vall, air}} + (1-\alpha) \cdot S_{\text{air, cap}} \cdot \frac{\overline{\mu_{\text{en}}/\rho}^{\text{cap, air}}}{\text{cap, air}}$$

SEFM

Una observación importante sobre los factores de corrección por la no equivalencia al aire de los materiales de la cámara más el capuchón es que, sin una notación especial, la AAPM lo emplea en el denominador de la ecuación para el cálculo del factor de calibración. En cambio, la IAEA y la SEFM introducen a K_m como un factor multiplicativo en las ecuaciones respectivas del cálculo del factor de calibración. En el protocolo de la AAPM, los valores correspondientes a este factor deberán tomarse de la tabla I de la página 749 del protocolo de la AAPM (24) y del Medical Physics vol.13 No.5 sep/oct 86. Para la IAEA y la SEFM los valores que se utilizan para k_m se presentan en la tabla XVII de la página 61 del protocolo de la IAEA (29) y de la tabla 4.1, página 4 del suplemento del protocolo de la SEFM (30).

Por otra parte, la eficiencia en la colección de iones A_{ion} , establecida por el ADCL, es incluida por la AAPM (40,41) y por la SEFM con el factor por efecto de saturación $(K_{\text{se}})_{\text{c}}$, siendo $A_{\text{ion}} = [(K_{\text{se}})_{\text{c}}]^{-1}$.

Finalmente, como en la hoja para el cálculo de dosis, la SEFM usa el factor por efecto de tallo $(K_{\text{st}})_{\text{c}}$ en la ecuación para el cálculo del factor de calibración.

2.4 TABLA DE COMPARACION DEL CONTENIDO DE LOS PROTOCOLOS.

Con el análisis de los apartados 2.3.2 y 2.3.3 se pueden resumir las semejanzas y las diferencias principales entre los protocolos, las cuales repercuten directamente en las ecuaciones de dosis y en las ecuaciones para el cálculo del factor de calibración.

Con el propósito de clarificar, en las tablas 2.11, 2.12, 2.13 y 2.14 se resumen las diferencias y las semejanzas en los contenidos. En la primera columna de cada tabla aparece una descripción del factor. En la segunda columna se da el número de identificación cuando corresponde a alguno de la hoja de trabajo. En las columnas restantes se indica a qué protocolo se refiere.

De manera global existen diferencias en la notación de los factores involucrados en el cálculo de la dosis pero, como lo más importante es el valor de la dosis, estas diferencias de notación dejan de ser trascendentes.

Para las diferencias, se debe agregar que los factores señalados en las tablas tienen además la característica de ser propios de sólo uno o dos protocolos.

En el caso de los factores para el cálculo de la dosis, P_{cal} se incluye en dos protocolos. En cambio K_{at} y P_{vall} sólo se incluyen en uno, pero es importante decir que K_{at} debe ser necesariamente muy próximo a la unidad (lo cual se consigue con casi todos los instrumentos que se fabrican actualmente) y P_{vall} es idéntico a la unidad en el caso de electrones.

Para el factor P_d se debe agregar que existiendo la propuesta de uniformizar las dosimetrías, incluida la de utilizar el concepto de punto efectivo de medida, es muy probable que en poco tiempo este factor desaparezca, pero se menciona como diferencia

Tabla 2.11: Contenido común de los protocolos en el cálculo de dosis.

DESCRIPCION	No.	AAPM	IAEA	SEFM
PROFUNDIDAD DEL 50% DE INTENSIDAD	[8]	d50	R50	R50
ALCANCE PRACTICO	[10]	Rp	Rp	Rp
RAZON DE PODERES DE FRENADO	[18]	$\frac{med}{(L/\rho)_{air}}$	Sw,air	Sw,air
FACTOR POR RECOMBINACION O DE SATURACION	[19]	Pion	Ps	(Ks)u
FACTOR POR REEMPLAZAMIENTO	[20]	Prepl	Pu	Pf

Tabla 2.12: Contenido común de los protocolos en el cálculo del factor de calibración.

DESCRIPCION	AAPM	IAEA	SEFM
IONIZACION PRODUCIDA EN LA PARED DE LA CAMARA	α	α	α
IONIZACION PRODUCIDA EN EL CAPUCHON	(1- α)	(1- α)	(1- α)
FACTOR DE ATENUACION	Awall	Katt	Kas

Tabla 2.13: Diferencias de contenido de los protocolos en el cálculo de dosis.

DESCRIPCION	No.	AAPM	IAEA	SEFM
ENERGIA MEDIA EN LA SUPERFICIE	(9)	\bar{E}_0	\bar{E}_0	\bar{E}_0
ENERGIA MEDIA A LA PROFUNDIDAD DE MEDIDA	(11)	\bar{E}_z	\bar{E}_z	\bar{E}_z
LECTURA CORREGIDA	(15)	$\overline{CM/UD}$	M_u	M_u^*
FACTOR DE CALIBRACION DE DOSIS	S/N	N_{gas}	N_d	N_d
FACTOR POR EFECTO DEL ELECTRODO CENTRAL	S/N	-----	P_{cel}	P_{cel}
FACTOR POR EFECTO DE TALLO	S/N	-----	-----	K_{st}
FACTOR POR DESPLAZAMIENTO	S/N	-----	-----	P_d SOLO EN CASO DE NO MEDIR EN EL PUNTO EFECTIVO
FACTOR POR EFECTO DE PARED	S/N	-----	-----	P_{wall}

nota: S/N significa sin número de identificación en hoja de trabajo para el cálculo de dosis correspondiente.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Tabla 2.14: Diferencias de contenido de los protocolos en el cálculo del factor de calibración.

DESCRIPCION	AAPM	IAEA	SEFM
FACTOR POR RECOMBINACION DE IONES	A_{ion}	-----	$(Ks)_c$
RAZON DE PODERES MASICOS DE FRENADO PARED/AIRE	$\frac{\overline{L}}{\rho}$ wall air	$S_{air, wall}$	$S_{air, wall}$
RAZON DE PODERES MASICOS DE FRENADO CAP/AIRE	$\frac{\overline{L}}{\rho}$ cap air	$Scap, air$	$Scap, air$
RAZON DE COEFICIENTES DE ABSORCION MASICOS DE ENERGIA AIRE/PARED	air $(\overline{\mu_{en}/\rho})$ wall	$(\overline{\mu_{en}/\rho})_{wall, air}$	$(\overline{\mu_{en}/\rho})_{wall, air}$
RAZON DE COEFICIENTES DE ABSORCION MASICOS DE ENERGIA AIRE/CAP	air $(\overline{\mu_{en}/\rho})$ cap	$(\overline{\mu_{en}/\rho})_{cap, air}$	$(\overline{\mu_{en}/\rho})_{cap, air}$
FACTOR POR LA NO EQUIVALENCIA AL AIRE DE LOS MATERIALES DE LA CAMARA MAS EL CAPUCHON	C_{α}	K_m	K_m
FACTOR POR DOSIS DEBIDA A ELECTRONES	β_{wall} INCLUIDO EN EL FACTOR A'_{wall}	-----	-----
FACTOR POR EFECTO DE TALLO	-----	-----	$(Kst)_C$

(α) La AAPM no da nombre a este factor, el cual es combinación de los cuatro factores que le preceden en esta misma tabla.

porque el protocolo de la SEFM lo incluye originalmente.

Las energías \bar{E}_0 y \bar{E}_x tienen su diferencia en la manera de calcularlas o de obtenerlas para su uso en los cálculos, y por esta razón aparecen en la tabla 2.13.

Los factores A_{ion} y $(K_0)_c$ se consideran en dos de los protocolos. El factor β_{vall} , implícito en el factor A_{vall} es un factor que no tiene similar en otro protocolo. El factor $(K_{at})_c$ no es muy relevante, pues es el mismo caso del factor por efecto de tallo utilizado para la corrección en el cálculo de dosis.

En conclusión, las diferencias más importantes entre los protocolos son: las energías \bar{E}_0 y \bar{E}_x , el factor por el efecto del electrodo central y el factor de calibración, dentro del cual se tienen diferencias en el factor por la recombinación de iones y los factores por la no equivalencia al aire de los materiales de la cámara y el capuchón.

CAPITULO 3

RESULTADOS EXPERIMENTALES

3.1 INTRODUCCION AL TERCER CAPITULO.

Este capítulo trata sobre el reporte de los preparativos y resultados experimentales del trabajo de dosimetría al seguir los protocolos de la AAPM, IAEA y SEFM. Se describe el dispositivo experimental que se empleó para la dosimetría de electrones (3.2). En el apartado 3.3 se explica la secuencia en el trabajo experimental. En otro apartado aparece el reporte de los resultados al experimentar con un acelerador de electrones modelo MEVATRON K-74 marca SIEMENS, con energías nominales de los electrones de 7, 10, 12, 15 y 18 MeV (3.4), instalado en el Hospital Universitario de Monterrey; Monterrey N.L. México.

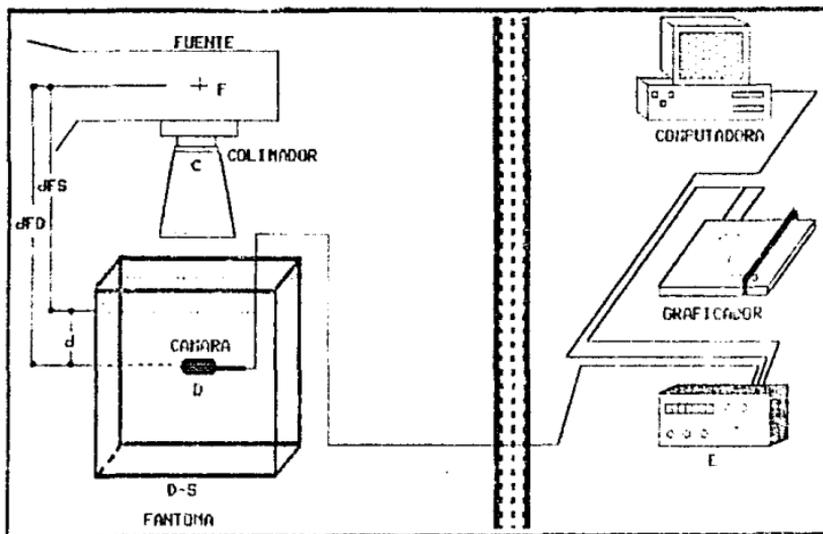
Conviene aclarar que, tanto en el reporte de los resultados como en el análisis de los mismos, se menciona la energía nominal en varias ocasiones. El sentido que esto tiene es para que la energía nominal sirva de referencia. Es decir, la energía nominal es un parámetro que usa sólo para referir algunos datos o resultados. Esto no ocurre en el caso de la energía más probable en superficie o la energía media en profundidad, porque éstas son obtenidas a partir de los parámetros de la fuente de electrones y varían de una fuente a otra.

3.2 DISPOSITIVO EXPERIMENTAL..

Para la dosimetría de electrones en el intervalo de 7 MeV a 18 MeV, e incluso hasta los 50 MeV, los instrumentos adecuados para mediciones son la cámara de ionización y un electrómetro. Respecto a la fuente de electrones de alta energía, es generalizado el uso en los hospitales de los aceleradores lineales de electrones.

De esta manera, elegido un protocolo de dosimetría y contando con los instrumentos señalados, se puede hacer dosimetría de electrones con el dispositivo experimental que aparece en la Figura 3.1 .

Figura 3.1: Dispositivo experimental para la dosimetría de electrones.



La fuente de radiación se denota como [F]. En ella es posible seleccionar la energía nominal de salida de los electrones; [C] denota el sistema de colimación, asociado a [F], que permite tener un haz colimado que se dirige al fantoma [D-S]. Dentro del fantoma se coloca la cámara en el punto donde quiere medir la dosis [D].

Los parámetros geométricos del dispositivo son: la distancia de [F] a la superficie del fantoma [dFS], la distancia desde [F] al punto de medida [dFD], el tamaño del campo de radiación, determinado por [C], sobre la superficie del fantoma y la profundidad a la que se encuentra la cámara dentro del fantoma [d], medida desde la superficie del fantoma. Esto se obtiene después de que la cámara se ha colocado perpendicularmente respecto a la dirección del haz, haciendo que el eje central del haz atraviese el punto de medida.

Finalmente el electrómetro [E], fuera del área de radiación directa, recibe la señal originada en [D], la cual viaja por el cable triaxial. La magnitud de la señal de [E] se puede analizar en un graficador o en una computadora, o se puede hacer un registro de la señal anotando la lectura que aparece en la pantalla.

En la tabla 3.1 se describen los equipos e instrumentos utilizados en este trabajo de dosimetría y que fueron dispuestos en la forma antes señalada.

3.3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

La secuencia en la dosimetría es la siguiente.

- 1.-Verificación del funcionamiento correcto de todos los equipos.

Esto se refiere a la verificación de las partes del

Tabla 3.1: Lista del equipo utilizado en este trabajo de dosimetría de electrones.

FUENTE:

Acelerador de electrones MEVATRON K-74, marca SIEMENS.

CAMARA DE IONIZACION:

modelo NEL Guarded Farmer 2571, SN 1603, con pared de grafito ($\rho=1.80$ g/cc) y capuchón de equilibrio electrónico de Delrin. Fecha y lugar de calibración: diciembre 15 de 1989 en el A.D.C.L.; Wisconsin, Madison U.S.A.

ELECTROMETRO:

marca Keithley, modelo 35614E ; SN 36838 .

FANTOMA:

Fantoma de agua de 30x30x45 cc, marca PTW-Freiburg, modelo MP-2, y graficador tipo X-Y.

INSTRUMENTOS PARA MEDIR PRESION Y TEMPERATURA:

barómetro aneroides y termómetro sumergible con escala mínima de 1°C .

dispositivo. Entonces, será necesario verificar que el acelerador esté listo para funcionar en forma continua.

En caso de usar un equipo automatizado de dosimetría, es necesario constatar el movimiento libre de la cámara dentro del fantoma y su correcta alineación y nivelación.

Se debe verificar la transmisión de las señales desde la cámara al electrómetro y a continuación verificar la estabilidad de la cámara (comparada con una fuente de referencia), el nivel de la corriente de fuga, el efecto de tallo y el efecto de la polaridad.

2.-Obtener las curvas de ionización en profundidad.

Las curvas de ionización en profundidad, para cada energía, se logran con un tamaño de campo de 10×10 cm² (este es el tamaño

actualmente aceptado (3m) o mayor y un barrido a baja velocidad (dos o tres milímetros por segundo), desde la superficie del fantoma, en la dirección del eje central del haz, hasta 25 cm de profundidad. De las curvas de ionización en profundidad deben obtenerse los parámetros del haz: alcance práctico (Rp), la profundidad de hemi-intensidad (d50) y profundidad del máximo de ionización (dmax).

3.-Realización de la dosimetría.

Finalizadas las pruebas del equipo, la dosimetría se realiza colocando la cámara en el punto de medición. Después, se toman las mediciones que, junto con los datos de la cámara, geometría y factores ambientales, se anotan en las hojas respectivas.

Con la información anterior se procede a la adquisición de los factores de corrección (razón de poderes de frenado másico restringido, el factor de corrección por fluencia, y el factor por recombinación de iones, entre otros). Con esta información se elaboran los cálculos de la dosis absorbida.

3.4 RESULTADOS.

Los resultados se presentan en el orden que fueron obtenidos. Primero, se indican las anotaciones sobre la verificación de los equipos (3.4.1). Enseguida aparecen las curvas de porcentaje de ionización en profundidad (3.4.2), los resultados de las mediciones (3.4.3) y los resultados de los cálculos de dosis absorbida (3.4.4), para las energías nominales de electrones de 7, 10, 12, 15 y 18 MeV.

3.4.1 Verificación de los instrumentos.

Los resultados de la verificación de la fuente, del sistema cámara de ionización-electrómetro y del sistema de posicionamiento de la cámara de ionización dentro de un fantoma de agua, y su

reproducibilidad, fueron los siguientes.

1) Verificación de la fuente:

a. Se determinó estable en base a la rutina de verificación establecida en el departamento de Física del Hospital Universitario de Monterrey.

b. Las condiciones generales de funcionamiento fueron aceptables, de acuerdo con las pruebas recomendadas por el fabricante.

c. Las condiciones geométricas fueron aceptables, en base a las pruebas de rutina de control de calidad establecidas por el departamento de Física del Hospital Universitario de Monterrey.

2) Verificación de la cámara de ionización y del electrómetro.

a. La corriente de fuga fué de 2×10^{-15} Amperes, valor considerado como aceptable para un equipo de estas características.

b. El equipo fué sometido a la prueba de estabilidad, teniendo una desviación del 1% respecto del valor de las lecturas realizadas en la fecha de calibración.

c. Se realizó la prueba del efecto de tallo, encontrando que este efecto no se aprecia en una exposición de 100 unidades monitor.

d. La prueba del efecto de polaridad reportó una desviación del 1% en el cociente de las lecturas con polaridades positiva y negativa, para un grupo de lecturas de 100 u.m.

3) Verificación del fantoma:

a. El fantoma fué alineado respecto al campo lumínico de referencia. El fantoma se niveló, consiguiendo que el plano de la

superficie del fantoma fuera perpendicular a la dirección del haz.

c. La reproducibilidad en la posición X e Y de la cámara, después de ejecutados varios movimientos del sistema motorizado de barrido, fué aceptable dentro del error de ± 0.05 mm.

3.4.2 Curvas de porcentaje de ionización en profundidad.

La técnica de medición, similar a la utilizada en la referencia (30), consistió en medir a una distancia nominal Fuente-Superficie de 100 cm. Las mediciones fueron hechas con un tamaño de campo de 10×10 cm² en un fantoma de agua de $30 \times 30 \times 45$ cc. La tensión de colección fué de -300 Vdc.

Siguiendo las recomendaciones de los tres protocolos sobre la corrección por el punto efectivo de medida (páginas 67 y 68 de este trabajo), el punto efectivo de medida se consideró a 2 mm del centro de la cámara, hacia el haz de radiación, en todos los casos. El barrido de la cámara se hizo en forma continua, con una rapidéz de 2 mm por segundo sobre el eje central del haz y en la dirección del mismo, hasta una profundidad en agua de 25 cm.

Las figuras 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6 muestran las curvas de porcentaje de ionización en profundidad para 7, 10, 12, 15 y 18 MeV, respectivamente. El eje vertical indica el porcentaje de ionización, normalizado respecto al máximo de ionización (100%), y el eje horizontal es la profundidad en centímetros de agua. En cada curva están indicados la profundidad del máximo de ionización (d_{max}), la profundidad del 50% de ionización (d_{50}) y el alcance práctico (R_p). Los valores obtenidos de estos parámetros, para cada energía, se muestran en la tabla 3.2.

Figura 3.2: Curva de porcentaje de ionización en profundidad para electrones de 7 MeV de energía.

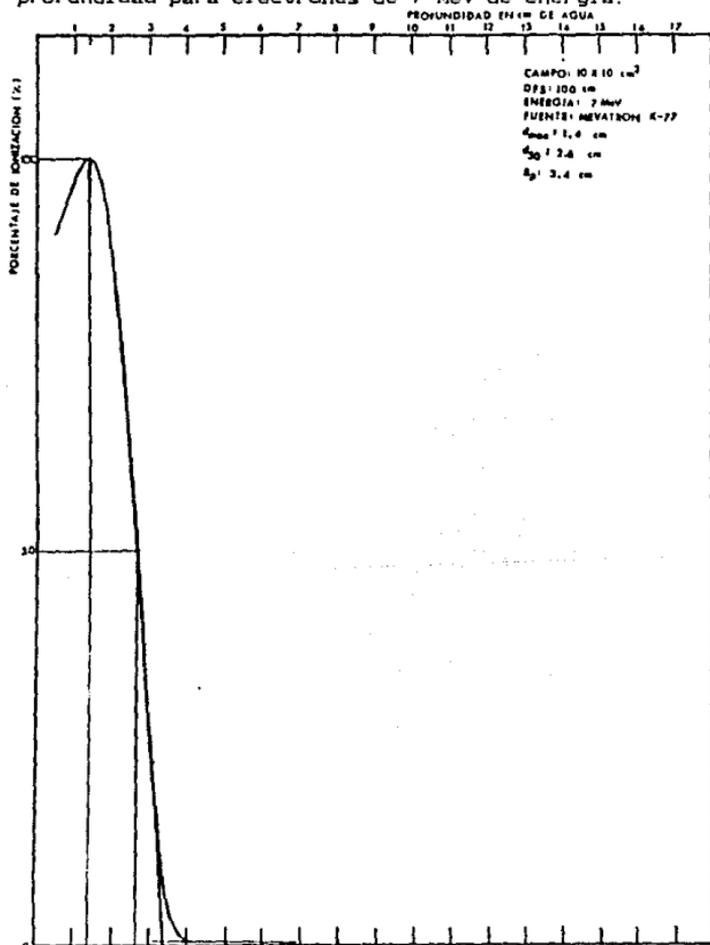


Figura 3.3: Curva de porcentaje de ionización en profundidad para electrones de 10 MeV de energía.

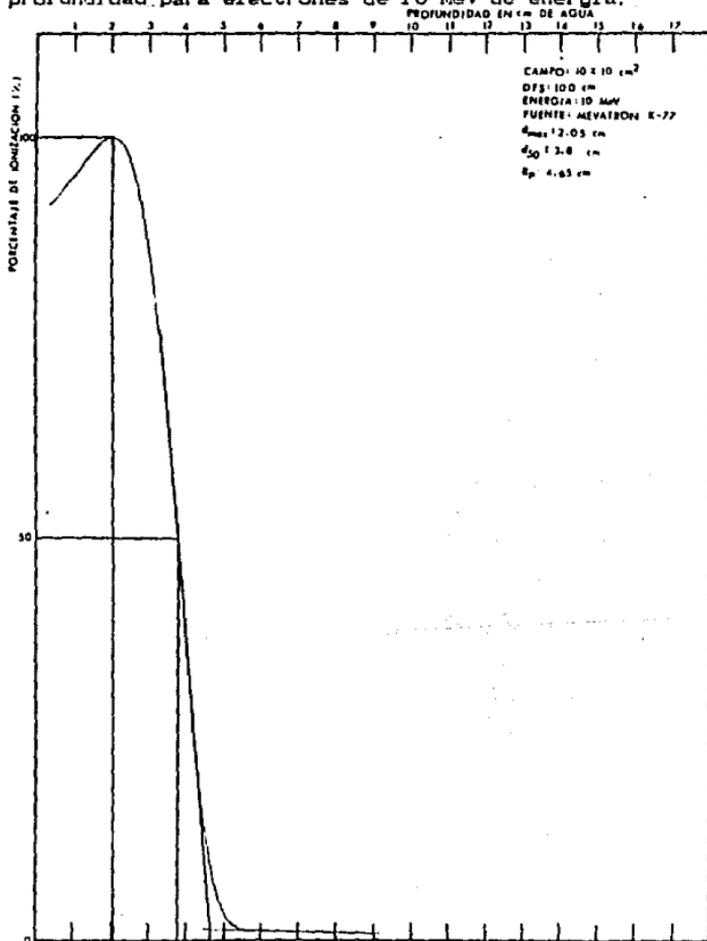


Figura 3.4: Curva de porcentaje de ionización en profundidad para electrones de 12 MeV de energía.

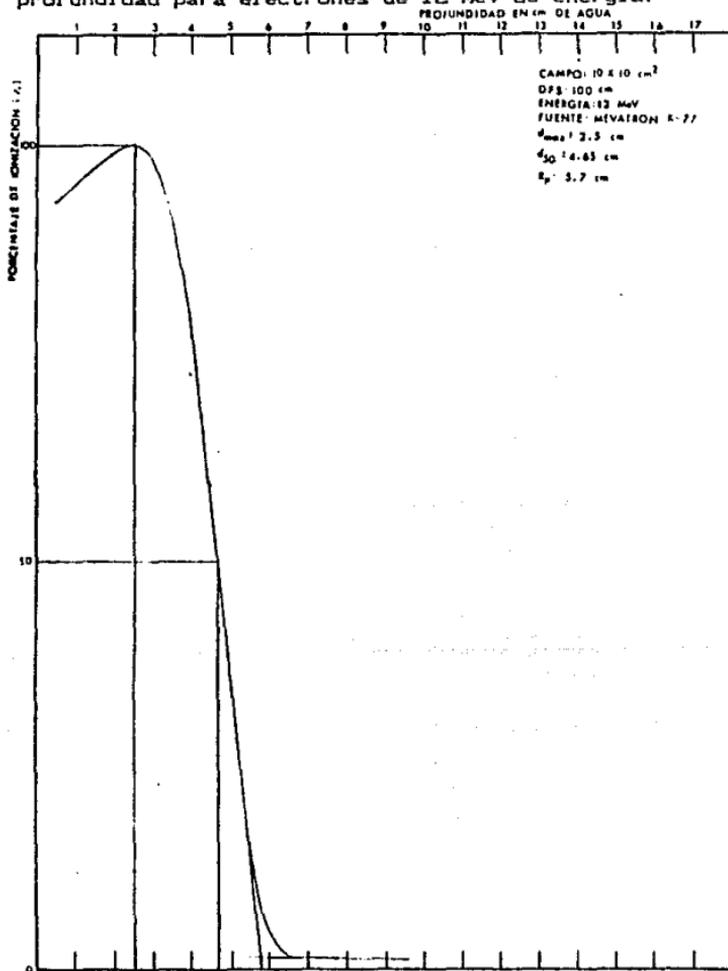


Figura 3.5: Curva de porcentaje de ionización en profundidad para electrones de 15 MeV de energía.

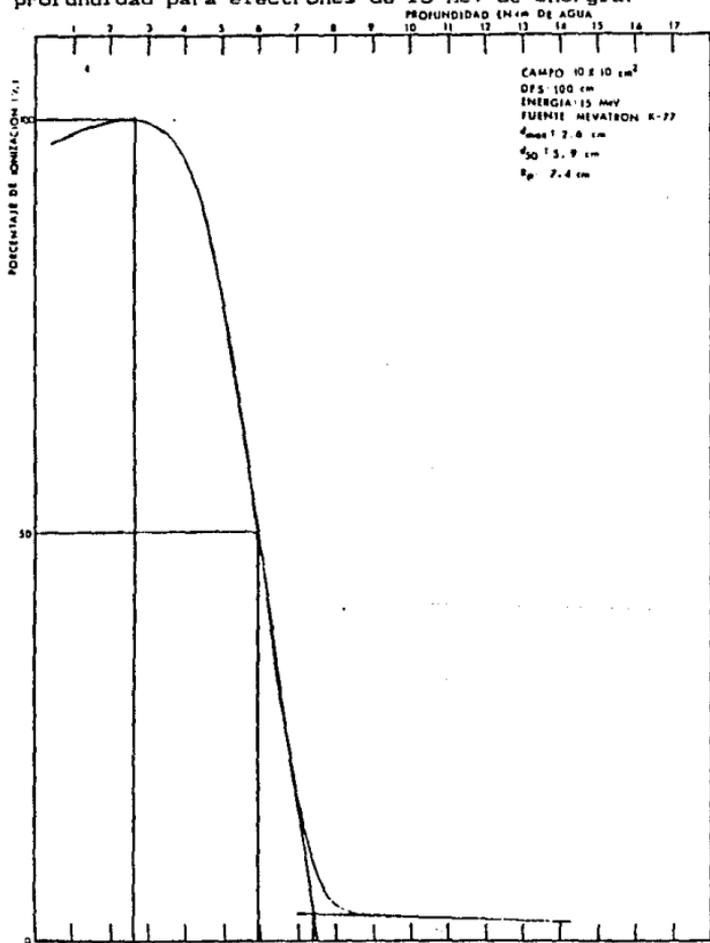


Figura 3.6: Curva de porcentaje de ionización en profundidad para electrones de 18 MeV de energía.

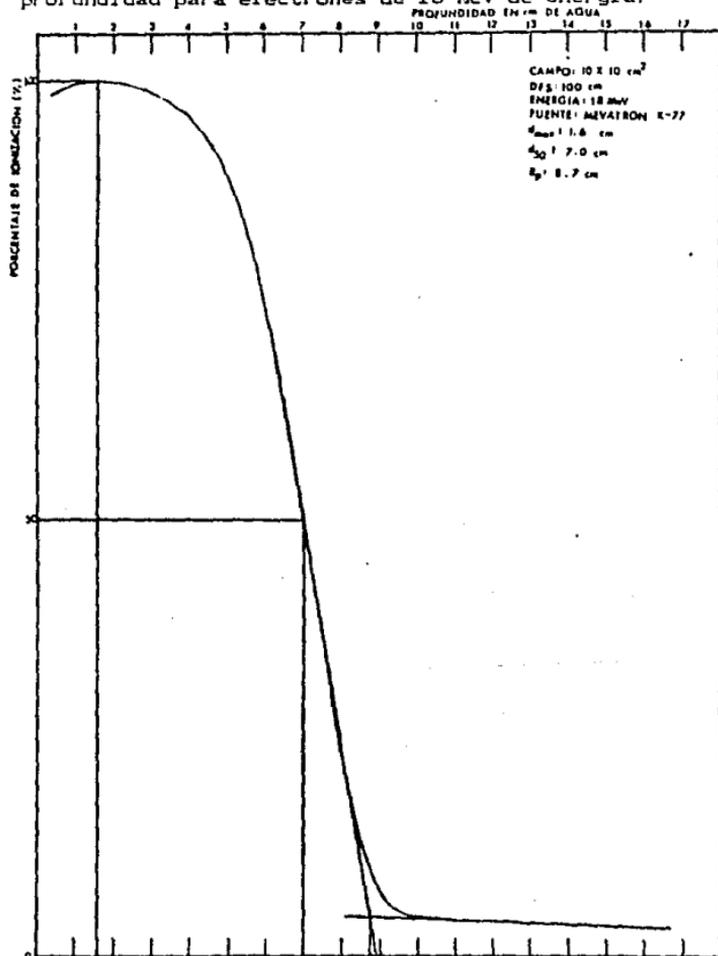


Tabla 3.2: Parámetros del haz de electrones del acelerador lineal Mevatron modelo K-74, marca Siemens; instalado en el Hospital Universitario de Monterrey, Monterrey N.L./México (junio de 1990).

ENERGIA NOMINAL (MeV)	d _{max} (cm)	d ₅₀ (cm)	R _p (cm)
7	1.4	2.6	3.4
10	2.05	3.8	4.65
12	2.5	4.65	5.7
15	2.6	5.9	7.4
18	1.8	7.0	8.7

3.4.3 Resultados de las mediciones.

Las mediciones se realizaron con el mismo equipo que se describe en el apartado 3.3.1. La distancia Fuente-Superficie (SSD) o DFSD fué de 100 cm, con un tamaño de campo de 10x10 cm². La profundidad de medición fué la correspondiente al valor de d_{max}, para cada energía, con 2 mm de corrección por el punto efectivo de medida, tomando en cuenta las sugerencias que los protocolos de la IAEA y la SEFM hacen al respecto (ver páginas 67 y 68 de este trabajo). El voltaje de colección fué de -300 Vdc. La fuente trabajó proporcionando una tasa de dosis de 300 u.m./min.

Para cada energía se tomaron las lecturas de la carga colectada en cinco ocasiones, con una exposición de 100 u.m. para cada lectura. Complementariamente se hizo la medición, bajo las mismas condiciones, con el voltaje reducido al 50%.

La tabla 3.3 muestra los resultados del cálculo de los factores de calibración y en el anexo 2 aparecen las hojas respectivas de estos cálculos.

Tabla 3.3: Resultados de los cálculos del factor de calibración de la cámara de ionización Marca NEL Guarded Farmer, modelo 2571 SN 1603, conectada al electrómetro marca Keithley modelo 35614E SN 36838, para cada protocolo, en unidades de Gy/C.

AAPM	IAEA	SEFM
40.13×10^6 Gy/C	40.45×10^6 Gy/C	40.41×10^6 Gy/C

La tabla 3.4 presenta los valores de las lecturas para la tensión de colección de -300 Vdc y -150 Vdc. Aparece aquí también una columna con los valores de la desviación estándar de las lecturas realizadas con -300 Vdc. Los valores son tabulados en función de la energía.

Tabla 3.4: Resultados de las lecturas obtenidas con 100 u.m., para las tensiones de colección de -300 y -150 Vdc y la desviación estándar asociada al grupo de lecturas de -300 Vdc.

ENERGÍA NOMINAL (MeV)	POSICIÓN DE LA CAMARA, EN PRO- FUNDIDAD (cm)	LECTURA	DESV.	LECTURA
		PROMEDIO (nC) A -300 Vdc	STD. (%)	PROMEDIO (nC) A -150 Vdc
7	1.6	21.52	1.0	21.23
10	2.25	21.97	0.6	21.70
12	2.7	21.96	1.1	21.74
15	2.8	22.47	1.0	22.24
18	1.8	23.57	0.6	23.30

Los valores de las medidas de la presión, la temperatura y la humedad relativa, durante las mediciones, fueron:

Presión: 956 mbar = 717 mmHg = 95.57 kPa
 Temperatura: 23.9 °C
 Humedad relativa: 58 %

3.4.4 Resultados de los cálculos de la dosis absorbida en agua.

Finalmente, la tabla 3.5 muestra los resultados del cálculo de la dosis absorbida en agua. La presentación se hace agrupando el valor de la dosis absorbida en agua, para cada energía y para cada protocolo. En el anexo 3 se presentan los ejemplos de llenado de las hojas para el cálculo de la dosis absorbida en agua, para cada protocolo, para electrones de 7 MeV.

Tabla 3.5: Resultados del cálculo de la dosis absorbida en agua a la profundidad del máximo de ionización, para cada energía y para cada protocolo.

ENERGIA NOMINAL (MeV)	AAPM	IAEA	SEFM
	[$\times 10^{-3}$] Gy/u. m.]		
7	9.84	9.78	9.73
10	9.80	9.79	9.74
12	9.56	9.70	9.69
15	9.67	9.80	9.75
18	9.96	10.08	10.07

CAPITULO 4

ANALISIS Y CONCLUSIONES

4.1 INTRODUCCION AL CUARTO CAPITULO.

En este capítulo se desarrolla el análisis de los resultados experimentales (4.2) que se reportaron en el capítulo 3. El análisis de los resultados consta de la evaluación de los resultados de los parámetros de la fuente de electrones y del análisis de los cálculos de los factores de calibración de dosis absorbida en el aire de la cámara de ionización y de los cálculos de la dosis absorbida en agua.

En el apartado 4.3 se desarrolla el análisis global de los resultados, en función de las hipótesis y los objetivos planteados en la introducción, lo que proporciona las conclusiones de este trabajo de tesis.

4.2 ANALISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES.

. El análisis inicia con la evaluación de los parámetros de la fuente: d_{max} , d_{50} y R_p (4.2.1) porque estos resultados permitirán ponderar el grado de confianza en los resultados de los cálculos de la dosis absorbida, dado que d_{50} y R_p son parámetros útiles para obtener los factores que se utilizan en esos cálculos. Los resultados experimentales de los parámetros de la fuente se comparan con los publicados en el artículo titulado "Electron Beam Central Axis Depth Dose Measurements", de Thomas H. Kirby; et al (Med. Physics 12(3), may/jun 1985, 357-361), que reporta un resumen de los parámetros de diferentes fuentes de uso clínico.

El análisis de los resultados de los cálculos de los factores de calibración de dosis en el aire de la cámara y de los cálculos de la dosis absorbida en agua se desarrolla en el apartado 4.2.2. Para el análisis de los resultados de los factores de calibración de dosis absorbida en el aire de la cámara, se hace uso de las ideas del artículo titulado "Cylindrical Chamber Dimensions and the Corresponding Values of A_{wall} and N_{gas} (N_x and A_{ion})", de Robert Gastorf; et al (Med. Phys. 13(5), sep/oct 1986; 751-754). Para el análisis de los cálculos de la dosis absorbida en agua, se emplea la idea de intercomparación desarrollada por P. Almond en el capítulo 2 del libro "Radiation Dosimetry. Physical and Biological Aspects". Orton, C. G.; Plenum Press, NY; U.S.A.

4.2.1 Análisis de los parámetros del haz.

Podemos tener una idea sobre la congruencia de los resultados experimentales de los parámetros del haz sí, con el fin de estimar el grado de confianza en los resultados, aceptamos como válida la comparación de los mismos con los reportados en revistas especializadas de reconocido prestigio. En base a esta premisa,

se presenta el análisis de los resultados experimentales.

La publicación de 1985 de Kirby & col. (9), que reporta valores de los parámetros d_{max} , d_{50} y R_p para diferentes fuentes de uso clínico y que incluye los correspondientes para electrones producidos en el MEVATRON K-74, se emplea como referencia para la comparación de los valores experimentales de dichos parámetros.

La comparación de los resultados de Kirby & col. con los resultados experimentales aparecen en la tabla 4.1. Las figuras 4.1, 4.2 y 4.3 muestran la comparación en forma gráfica.

Tabla 4.1 :Comparación de los resultados de los parámetros d_{max} , d_{50} y R_p para electrones producidos en el MEVATRON K-74. El primer renglón de cada parámetro presenta los resultados experimentales y el segundo renglón presenta los valores reportados por Kirby & col.

	7	ENERGIA NOMINAL (MeV)			18
		10	12	15	
d_{max} (cm)					
experimental	1.4	2.05	2.5	2.6	1.6
Kirby & col.	1.5	2.3	2.7	2.8	1.3
d_{50} (cm)					
experimental	2.6	3.8	4.65	5.9	7.0
Kirby & col.	2.7	3.9	4.6	6.0	7.0
R_p (cm)					
experimental	3.4	4.65	5.7	7.4	8.7
Kirby & col.	3.3	4.7	5.8	*	8.5

* valor no reportado.

Figura 4.1: Parámetros del haz. Comparación de los valores experimentales de d_{max} con los reportados por Kirby & col. (cm), en función de la energía.

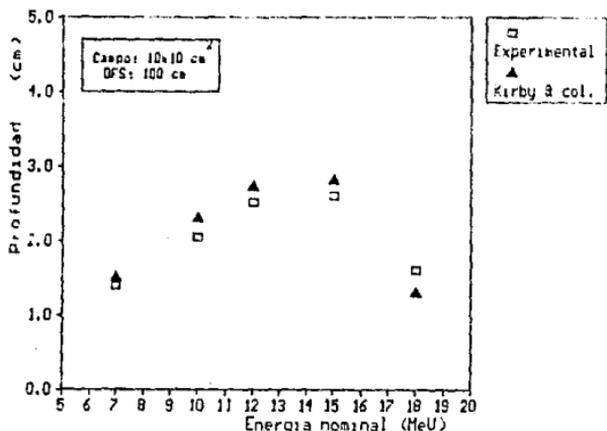


Figura 4.2: Parámetros del haz. Comparación de los valores experimentales de d_{50} con los reportados por Kirby & col. (cm), en función de la energía.

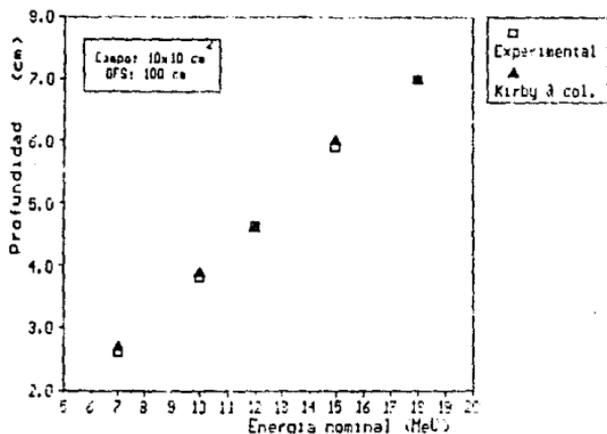
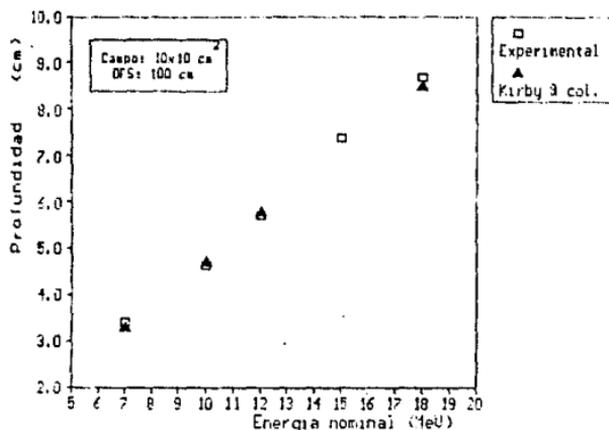


Figura 4.3: Parámetros del haz. Comparación de los valores experimentales de R_p con los reportados por Kirby & col. (ca), en función de la energía.



Tomando en cuenta los errores experimentales, los errores por el empleo de métodos gráficos para obtener dichos parámetros, y lo indicado por Kirby & col. que habla de la reproducibilidad de los valores que ahí se reportan, en un intervalo de ± 2 mm y con una desviación estándar menor a 1 mm, se puede concluir que los resultados experimentales de los parámetros del MEVATRON K-74 son aceptables, porque son congruentes con los reportados por Kirby & col. . Por lo tanto, los resultados posteriores tendrán una justificada validez.

En los resultados de las figuras 4.2 y 4.3, cabe destacar la notable relación lineal de d_{50} y R_p con la energía, tanto de los valores experimentales, como los reportados por Kirby & col.

4.2.2 Análisis de los cálculos de los factores de calibración de dosis absorbida en el aire de la cámara y de los cálculos de la dosis absorbida en agua.

Este apartado principia con el análisis de los resultados de los cálculos de los factores de calibración de dosis absorbida en el aire de la cámara.

Como referencia para el análisis de los resultados de los cálculos de los factores de calibración se empleó el artículo de 1986 de Robert Gastorf & col. (39), en el que se presenta una amplia información actualizada sobre varias cámaras de ionización.

En el artículo aparecen, siguiendo la notación de la AAPM, los valores de la razón $N_{gas}/N_x \cdot A_{ion}$ para cada cámara, donde N_{gas} es el factor de calibración de dosis absorbida en el gas de la cámara de ionización en Gy/C, N_x es el factor de calibración de exposición de la cámara cuando es expuesta a una fuente de Co-60 y que el laboratorio de calibración reporta en R/C, y A_{ion} es el factor de corrección por recombinación de iones.

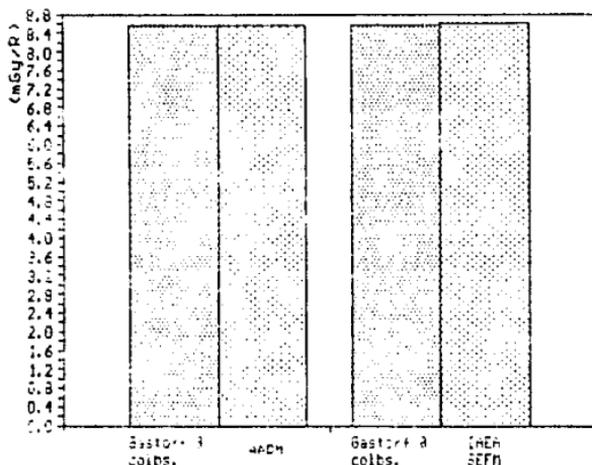
El valor que reporta Gastorf & col. de $N_{gas}/N_x \cdot A_{ion}$ para la cámara NEL Farmer 2571 es de 8.54mGy/R. Los valores equivalentes, para cada protocolo, se presentan en la tabla 4.2 en la que aparecen los factores involucrados en el cociente $N_{gas}/N_x \cdot A_{ion}$ y la figura 4.4 muestra la comparación gráfica entre el valor de Gastorf & col. y los obtenidos con cada protocolo.

La comparación muestra una discrepancia del 0.2% entre el valor de Gastorf & col. con la AAPM y del 0.9% con la IAEA y la SEFM. De este modo, los valores obtenidos con los protocolos se encuentran dentro del 1% de variación, ubicándose en el intervalo de máxima desviación esperada por Gastorf & col.

Tabla 4.2: Valores de los factores $N_{gas}/N_x \cdot A_{ion}$ para cada protocolo. N_{gas} es el factor de calibración dosis absorbida en el gas de la cámara en Gy/C, N_x es el factor de calibración de exposición en R/C. A_{ion} y sus equivalentes P_a y $(K_a)_c$, son los factores de corrección por recombinación de iones.

AAPM	IAEA	SEFM
$N_{gas}=40.13 \times 10^6$ Gy/C	$N_D=40.45 \times 10^6$ Gy/C	$N_D=40.41 \times 10^6$ Gy/C
$N_x=4.693 \times 10^9$ R/C	$N_x=4.693 \times 10^9$ R/C	$N_x=4.693 \times 10^9$ R/C
$A_{ion}=0.999$	$P_a=1.00$	$(K_a)_c=1.001$
$C(N_{gas}/N_x \cdot A_{ion})$	$C(N_D \cdot P_a / N_x)$	$C(N_D \cdot (K_a)_c / N_x)$
8.58 mGy/R	8.62 mGy/R	8.62 mGy/R

Figura 4.4: Comparación entre los valores de la razón $N_{gas}/N_x \cdot A_{ion}$ reportada por Gastorf & col. (99), con la obtenida para cada protocolo.



Por otra parte, entre protocolos la máxima diferencia es del 0.7% . Por lo tanto, esto nos permite hablar de dos grupos de resultados: el grupo de resultados de la AAPM y el grupo de resultados de la IAEA y la SEFM.

Por lo anterior, los resultados concuerdan con los publicados por Gastorf & col. , pero cabe notar que la discrepancia del 0.7% entre los protocolos se transferirá a los cálculos de la dosis absorbida en agua, como si se tratara de un error sistemático.

Los resultados de los cálculos de la dosis absorbida en agua se analizan siguiendo la idea de intercomparación desarrollada por Almond (capítulo 2 (5)), basada en el cálculo del cociente de la dosis absorbida en agua D_w , en unidades de Gy/U, y el producto del factor de calibración de exposición N_x , en unidades de R/C, y el promedio de la lectura M , en unidades de C/U. Los valores del cociente, en unidades de Gy/R, para cada energía y protocolo, aparecen en la tabla 4.3 y la figura 4.5 muestra gráficamente la comparación de los resultados.

Los resultados de los cálculos de la dosis absorbida en agua presentan una máxima diferencia de -2.0% entre la AAPM y la IAEA, en la energía de 10 MeV. Además, de la figura 4.5 se puede apreciar que los valores de la dosis absorbida en agua para la IAEA y la SEFM siempre son mayores a los de la AAPM.

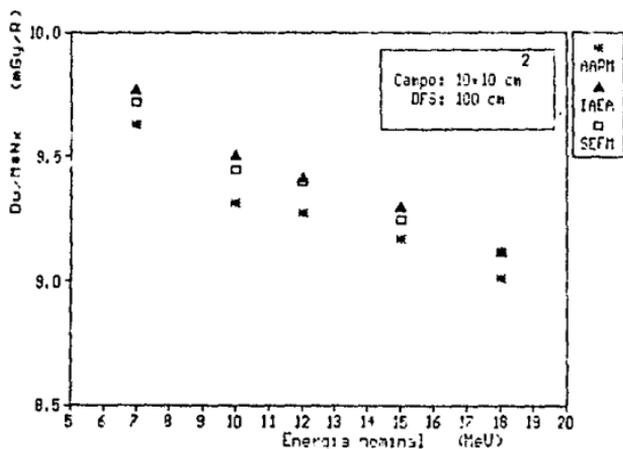
Los valores de la dosis absorbida en agua obtenidos en la IAEA son aproximados a los de la SEFM, con la máxima diferencia de 0.5% en los 7, 10 y 15 MeV . Esta diferencia se puede explicar a partir de discrepancias en el factor de corrección por presión y temperatura (~0.1%) y la propagación del ~0.3% por el redondeo en las milésimas de cada lectura corregida.

El 2.0% de máxima discrepancia entre los resultados de los cálculos de la dosis absorbida en agua, y otros porcentajes menores, tiene sus orígenes en la manera de evaluar la energía

Tabla 4.3: Resultados de los cálculos de la dosis absorbida en agua, en función de la energía. Los valores representan a la constante $D_w/N_x \cdot M$ en [mGy/R], con D_w la dosis en agua en [Gy/U], N_x el factor de exposición en [R/C] y M el promedio de la lectura en [C/U].

ENERGIA	AAPM	IAEA	SEFM
C MeV	$D_w/N_x \cdot M$ [mGy/R]		
7	9.63	9.77	9.72
10	9.31	9.50	9.45
12	9.27	9.41	9.40
15	9.17	9.29	9.24
18	9.01	9.11	9.11

Figura 4.5: Comparación de los resultados de los cálculos de dosis en función de la energía.



media en superficie \bar{E}_0 (lo que produce diferencias en la selección de los factores de los poderes máxicos de frenado), en el factor de corrección por recombinación de iones (calculado por métodos gráficos en la AAPMD, en los valores del factor de corrección por reemplazamiento (utilizado por la AAPM como una aproximación para mediciones en agua y que originalmente fué propuesto para mediciones en fantasmas de acrílico, como se explica en el mismo protocolo en referencia a los valores de la tabla VIII de la página 758), y sobre todo en el empleo del factor de corrección por efecto del electrodo central que aporta una diferencia del 0.8%, incluido por la IAEA y la SEFM, y la diferencia propagada del 0.7% desde el cálculo de los factores de calibración.

Independientemente de las diferencias discutidas, se tiene la incertidumbre implícita por el uso de los factores de corrección (3.7%) y la incertidumbre en la calibración desde un laboratorio primario de calibración (1.0%), que arrojan la incertidumbre máxima esperada del 4.0% (2 σ), es decir, esta es la incertidumbre hasta la determinación de la dosis absorbida por parte del usuario, al medir en el punto de referencia de la cámara de ionización.

De esta forma, el análisis de los resultados nos muestra lo siguiente:

- a) Los valores de la dosis absorbida en agua con el protocolo de la AAPM son menores, en comparación a los de la IAEA y los de la SEFM.
- b) Las diferencias entre los tres protocolos no supera el 2.0%, que se da entre los resultados de los cálculos de la dosis absorbida en agua de los protocolos de la AAPM y la IAEA.
- c) De los resultados de los cálculos del factor de calibración de dosis absorbida en el gas de la cámara y de la dosis absorbida en agua se establece la diferencia entre el protocolo de la AAPM y

los protocolos de la IAEA y la SEFM, porque los resultados entre estos dos últimos es menor al 0.5%, en concordancia con lo reportado por Mattson (42).

d) Las diferencias tienen origen, principalmente, en el factor de calibración de dosis absorbida en el gas de la cámara, que se obtiene en cada protocolo, y el factor de corrección por el efecto del electrodo central. También, las diferencias son debidas a la inclusión u omisión de factores de corrección, la manera de obtener algunos de ellos (como los de recombinación) y la interpolación y el redondeo en los resultados durante los cálculos, principalmente en los factores de reemplazamiento y la razón de los poderes de frenado.

e) Para cada protocolo se tiene una incertidumbre implícita del 4.0% , por la calibración de la cámara en el laboratorio de calibración y por el uso de los valores publicados en los protocolos.

4.3 CONCLUSIONES DEL TRABAJO DE TESIS.

Las conclusiones sobre este trabajo de tesis se desarrollan en tres niveles:

- 1.-Sobre los resultados globales de la comparación en función de las expectativas previas al trabajo.
- 2.-Sobre los resultados en vías a su aplicación en los centros hospitalarios, y
- 3.-Sobre asuntos generales concernientes a la dosimetría.

Respecto al primer punto se concluye que a la luz de la diferencia máxima del 2.0% entre los protocolos, este resultado va de acuerdo con la hipótesis inicial de la igualdad esperada en el

cálculo de la dosis absorbida, con el seguimiento de cualquiera de los protocolos, ya que se partía de la idea de que bajo las mismas condiciones de irradiación una fuente de electrones deposita la misma cantidad de dosis. Sin embargo, quedaba planteada la duda de llegar a medir la misma dosis absorbida con cada protocolo, con base en las diferencias de contenido entre los mismos.

Aunque algunas diferencias desaparecieron con las correcciones y actualizaciones hechas a los protocolos originales (36,37,39,40), otras prevalecen básicamente en los valores de los factores y en las ecuaciones para el cálculo del factor de calibración de dosis absorbida en el gas de la cámara y en el cálculo de la dosis absorbida en agua. Por los resultados obtenidos, se aprecia la notable similitud de procedimiento y resultados de los protocolos de la IAEA y la SEFM, y también se aprecia que el protocolo de la AAPM es diferente a los otros dos.

Lo anterior da la pauta para hablar sobre el segundo punto, donde se debe notar que la dosimetría en este trabajo de tesis se realizó en la forma como se hace en un hospital. Por otro lado, se espera, a partir de los resultados de este trabajo de tesis, que los usuarios de estos y otros protocolos tengan una clara referencia sobre los puntos de discrepancia. Con esto se pretende dar confianza a los usuarios para que consideren la opción de incluir en su trabajo el uso de alguno de los protocolos estudiados porque además se incluyeron las actualizaciones de los mismos (36,37,39,42-45).

Para esto hay que decir que el esfuerzo del comité de la AAPM por publicar un protocolo de amplia cobertura está justificado por los resultados que aquí y en otros centros hospitalarios se han obtenido. Aunque el protocolo es poco entendible en algunas de sus partes y ha sido puesto a discusión su contenido (39,40,43,45), el protocolo original de la AAPM es un protocolo completo en cuanto a valores de los factores incluidos. Además,

este protocolo tiene la ventaja de contar con un importante respaldo por parte de los laboratorios de calibración (Accredited Dosimetry Calibration Laboratory ADCL, National Institute of Standards and Technology NIST) y un trabajo de actualización con aportes de la comunidad que lo ha venido usando como protocolo de calibración para electrones y fotones en centros hospitalarios de los EE. UU.

Al respecto Loevinger (43) explica que el protocolo de la AAPM

"es muy flexible y cubre muchos instrumentos diferentes y fantasmas de diferentes materiales y procedimientos de medición...", y "es adaptable porque es modular y se pueden actualizar nuevos valores a los factores porque éstos están explícitos. El protocolo es de alta precisión a la que contribuyen las hojas de trabajo de ejemplo".

En cuanto a los inconvenientes del protocolo de la AAPM, el mismo autor menciona que

"el protocolo es largo y complejo, sus graficas y tablas tienen algunos inconvenientes, omite la corrección por el efecto del electrodo central y requiere detallada información sobre la cámara."

Respecto al protocolo de la SEFM, la experiencia obtenida con este protocolo nos lleva a comentar que, al igual que lo menciona Brosed (44), éste se aproxima a lo que la práctica de la dosimetría requiere. El mismo autor comenta que el protocolo de la SEFM tiene la virtud de ser el primer protocolo en español (de gran utilidad para el área latina), es similar al protocolo de la AAPM pero también incluye el concepto de punto efectivo.

También en este trabajo se pudo constatar que no es fácil entender en un primer momento el protocolo de la SEFM. Al respecto Mijneer (45) comenta que

"se tiene que invertir mucho tiempo antes de aplicar el protocolo, pues tiene muchos detalles."

La comparación de Mijneer de los protocolos de la AAPM y de la SEFM arrojaron una diferencia del 2.0% (45); pequeña y posiblemente porque

"los valores de algunos factores (del protocolo de la SEFM fortuitamente compensan a otros."

Pero el mayor esfuerzo, de mayor envergadura, ha quedado a cargo de la IAEA quien emitió su protocolo con miras a uniformizar el trabajo de dosimetría a nivel mundial. Con este fin, incluidas las múltiples opciones para el trabajo de dosimetría, es que este protocolo ha sido integrado de una manera completa con gran sencillez, cubriendo la más amplia gama de posibilidades de instrumentación. La sencillez en el manejo y seguimiento de este protocolo, así como su contenido actualizado, fueron puntos comprobados durante este trabajo de tesis por lo que se propone ponerlo en práctica por ser el más sencillo de entender y por que cubre una amplia gama de posibilidades en instrumentación, además de contar con datos actualizados.

Se puede abundar en que la discrepancia del 2.0%, aunada al 4.0% de incertidumbre por el uso del protocolo, nos permite pensar que, en el caso extremo del manejo de un error del 6%, este valor de incertidumbre no se aleja del porcentaje de error aceptado para los tratamientos en radioterapia que, en la actualidad, tienen una clara tendencia a disminuir en base a un mejor control sobre las variables involucradas, entre las que se incluyen las que tienen que ver con la dosimetría, esperando alcanzar un valor que no supere el 3% de incertidumbre.

Finalmente es importante mencionar que los resultados obtenidos a 18 MeV deben ser revisados, utilizando un mejor criterio sobre la manera de precisar el valor experimental de d_{max} , y queda abierta la posibilidad para la revisión de los protocolos con otras clases de fantasmas y/o instrumentos, así como lo relacionado a la dosimetría de fotones.

BIBLIOGRAFIA

- [1] "Esterilización por Irradiación de Productos Desechables de Uso Médico y de Productos Farmacéuticos". Reyes Luján, Javier. Programa de tecnología, INEN. Instituto de Física, UNAM. IFUNAM-77-401; México, 1977.
- [2] "Estado Actual y Aplicaciones de la Tecnología de Irradiación". Uribe R., Roberto. Instituto de Física UNAM, IFUNAM-75-402 ; México, 1975.
- [3] "Curso Práctico de Dosimetría Física en Radioterapia". Brosed, Antonio. University of Texas. Health Science Center & Cancer Therapy and Research Center; 1988.
- [4] "Fundamentals of Radiation Dosimetry". Greening, J.R. Medical Physics Handbooks No. 6, Adam Hilger Ltd, Bristol; in collaboration with the Hospital Physicists Association
- [5] "Radiation Dosimetry Physical and Biological Aspects". Orton, Colin G. Plenum Press, NY; USA, 1988. Capítulo 2.
- [6] "Physics of Radiology". Johns, H.E. & Cunningham, J.R. Fourth Edition. Charles C. Thomas Publisher, 1983.
- [7] "The Interaction of Beta Particles with Matter", en "Nuclear Spectroscopy". Wu, C.S. Editorial F. Ajzenberg-Slove; Academic Press, USA. Capítulo 1.
- [8] "The Atomic Nucleus". Evans D., Robley. Mc.Graw-Hill Book Co., Inc.; U.S.A. 1955.

- [9] "Radiation Dosimetry: Electron Beams with Energies Between 1 and 50 MeV". ICRU REPORT 35. International Commission on Radiation Units and Measurements; USA, 1984.
- [10] "Procedimientos Recomendados para la Dosimetría de Fotones y Electrones de Energías Comprendidas entre 1 MeV y 50 MeV en Radioterapia de Haces Externos". Sociedad Española de Física Médica (S.E.F.M.); Publicación número 1/1984, Comité de Dosimetría en Radioterapia; Madrid, 1984.
- [11] "Dosage Calculations in Radiation Therapy". Saylor, W.L. & Ames, T.E. Urban & Schwarzenberg; Baltimore-Munich; 1979.
- [12] "Radiation Dosimetry: Electrons with Initials Energies Between 1 and 50 MeV". ICRU REPORT 21. International Commission on Radiation Units and Measurements; USA, 1972.
- [13] "Radiation Quantities and Units". ICRU REPORT 33. International Commission on Radiation Units and Measurements; USA, 1980.
- [14] "British Journal of Radiology, Supplement 17th". British Institute of Radiology; UK, 1981.
- [15] "Stopping Powers for Electrons and Positrons". ICRU REPORT 37. International Commission on Radiation Units and Measurements; USA, 1984.
- [16] "Code of Practice for Electron Beam Dosimetry in Radiotherapy". Phy. Med. Biol. Vol. 30, No. 11, 1169-1194.
- [17] "Dosimetry Instrumentation". Rad. Onc. Phys. 86, p. 110.
- [18] "Magnitudes y Unidades de Reacciones Nucleares y Radiaciones Ionizantes". Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 1987.
- [19] "Electron Beam Central Axis Depth Dose Measurements". Med. Phys. 12(3), May/June 1985; AAPM.

- [20] "Low Level Measurements. Electrometer Measurements". Keithley Instruments, 1984.
- [21] "Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry". Attix, F.H. John Wiley & Sons, U.S.A.; 1986
- [22] "Mean Energy in Electron Beams". Andreo, Pedro. Med. Phys. 8(5), Sep/Oct, 1981.
- [23] "Absorbed Dose Determination in Photon and Electron Beams. An International Code of Practice". International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna. Technical Reports Series No. 277, 1987.
- [24] "A Protocol for Determination of Absorbed Dose from High-Energy Photon and Electron Beams". Task Group 21, Radiation Therapy Committee. American Association of Physicist in Medicine (AAPM); Medical Physics 10(6), Nov/Dec; 1983.
- [25] "Dosimetric Instrumentation". Leroy & Humphries. AAPM Continuing Education Workshop. Electron Linear Accelerators in Radiation Therapy. California, USA; 1981.
- [26] "Nuclear Radiation Detection". Price, J. William. Second Edition. Mc.Graw Hill Book Co., 1964.
- [27] "Conceptos de Física Moderna". Beiser, A. Mc.Graw-Hill, México; 1981.
- [28] "Clasificación de Instrumentos de Metrología de Radiaciones Ionizantes". Ministerio de Industria y Energía. Dirección General de Innovación Industrial y Tecnológica. Sistema de Calibración Industrial. Madrid, España; 1986.
- [29] "Comparison of Different Protocols for the Dosimetry of High-Energy Photon and Electron Beams". Mattsson, Olof. Radiotherapy and Oncology, 4(1985); 313-318.
- [30] "Instrumentación Nuclear". Tamaro Sanz, Agustín. Servicio de publicaciones de la junta de energía nuclear; Madrid, 1970.

- [31] "Aceleradores de Electrones en México". Simposio. Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (I.N.I.N.); México, 1986.
- [32] "Code of Practice for Electron Beam Dosimetry in Radiotherapy". Physics in Medicine and Biology; Vol. 30, No. 11, 1169-1194
- [33] "Cylindrical Chamber Dimensions and the Corresponding Values of A_{wall} and $N_{gas}/(N_x \text{ and } A_{ion})$ ". Gastorf, Robert; et al. Med. Phys. 13(5), Sep/Oct 1986; 751-754.
- [34] "Report of Calibration for Ionization Chamber". Accredited Dosimetry Calibration Laboratory. Department of Medical Physics; University of Wisconsin; Madison, WI U.S.A. Report No. ION778 ; Dec. 15, 1989.
- [35] "Mevatron; Performance Specifications". Medical Linear Accelerators for X-Ray and Electron Radiation Therapy. SIEMENS Medical Laboratories Inc. Walnut Creek, CA U.S.A.
- [36] "Procedimientos Recomendados para la Dosimetría de Fotones y Electrones de Energías Comprendidas entre 1 MeV y 50 MeV en Radioterapia de Haces Externos". Sociedad Española de Física Médica (S.E.F.M.); Comité de Dosimetría en Radioterapia. Suplemento a la Publicación No. 1/1984. Madrid.
- [37] "Clarification of the AAPM Task Group 21 Protocol". Schulz, R. J.; et al. Med. Phys. 13 (5), Sep/Oct 1986; 755-759.
- [38] "Electron Beam Central Axis Depth Dose Measurements". Kirby, Thomas H.; et al. Med. Phys. 12(3), May/June 1985; 357-361.
- [39] "Equations for N_{gas} and N_{air} in Terms of N_x and N_k ". Attix, F. H. Med. Phys. 16(5), Sep/Oct 1989; 803-806.
- [40] "Understanding the AAPM Group 21 Calibration Protocol for Photons and Electrons". Hanson, W. F. A.A.P.M. Meeting, P.139-147.

- [41] "Average Energy Required to Produce an Ion Pair". ICRU REPORT 31. International Commission on Radiation Units and Measurements; USA, 1979.
- [42] "Comparison of Different Protocols for the Dosimetry of High-Energy Photon and Electron Beams". Mattson, Olof. Radiotherapy and Oncology, 4 (1985); 313-318.
- [43] "The New AAPM Protocol". Loevinger, R. Radiotherapy and Oncology, 4 (1985); 295-298.
- [44] "The Spanish Dosimetry Protocol". Brosed, A.; et al. Comité de Dosimetría en Radioterapia. Sociedad Española de Física Médica. Radiotherapy and Oncology, 4 (1985); 305-307.
- [45] "Summary of The Discussion on The Practical Use and Comparison of New Protocols for The Dosimetry of High-Energy Photon and Electron Beams". Mijneer, B.J. Radiotherapy and Oncology, 4 (1985); 325-328.

ANEXO 1

FORMULAS DE LOS PODERES DE FRENADO MASICO POR COLISION Y POR RADIACION PARA ELECTRONES

El poder de frenado másico por colisión para electrones, que representa el valor esperado de la pérdida de energía por unidad de camino recorrido x , por un electrón con energía cinética T en un medio de densidad ρ , puede escribirse como:

$$\left[\frac{dT}{\rho dx} \right]_c = \left[\frac{dT}{\rho dx} \right]_c^b + \left[\frac{dT}{\rho dx} \right]_c^d \quad \text{ec.1}$$

donde:

$$\left[\frac{dT}{\rho dx} \right]_c = \int_{T'_{\min}}^H T' Q_c^b \cdot dT' + \int_H^{T'_{\max}} T' Q_c^d \cdot dT' \quad \text{ec.2}$$

con c, b y d indicando colisión, colisión blanda y colisión dura, respectivamente.

De la ecuación 2 se tiene que:

1. T' es la energía transferida al átomo o a un electrón orbital, durante la interacción.

*tomado del libro de Attix (21), cap. 8.

2. H es alguna energía arbitraria que marca la división entre las colisiones blanda y dura , en términos de T' .

3. T'_{max} es la energía máxima que puede ser transferida en una colisión directa con un electrón orbital, que se supone no libre. En el caso de electrones, el electrón primario y el electrón blanco son indistinguibles después de la colisión, de acuerdo a la teoría de Dirac. Así, por convención, el electrón que salga con la mayor energía es siempre considerado como el electrón primario y $T'_{max} \equiv T/2$.

4. T'_{max} se relaciona con T'_{min} por:

$$\frac{T'_{max}}{T'_{min}} = \left[\frac{(1.022 \cdot 10^8 \text{ eV}) \cdot \beta^2}{I} \right]^2$$

en donde I es el potencial medio de excitación y representa el valor de la media geométrica de todos los potenciales de ionización y excitación de un átomo del medio absorbente. I sólo depende del medio (no depende del tipo de partícula) y existen valores experimentales para I de algunos elementos y de algunos compuestos. $\beta = v/c$, donde c es la velocidad de la luz en el vacío.

5. Q_c^b y Q_c^d son los coeficientes diferenciales másicos de colisión, para colisiones blanda y dura, respectivamente. Las unidades de estos coeficientes son, regularmente, en cm^2/g .

La fórmula del poder másico de frenado por colisión para electrones (según Møller en combinación con la fórmula de Bethe para colisiones blandas), se expresa en la ecuación siguiente:

$$\left[\frac{dT}{\rho dx} \right]_c = \frac{2Cm_0c^2z^2}{\beta^2} \left[\text{Ln} \left(\frac{\tau^2(\tau+2)}{2(I/m_0c^2)^2} \right) + F(\tau) - \delta - U \right] \quad \text{ec. 3}$$

donde:

$$C \equiv \pi(N_A Z/A)r_0^2 = 0.150 Z/A \text{ cm}^2/\text{g} .$$

$N_A Z/A$, es el número de electrones por gramo del medio de número atómico Z .

$r_0 = e^2/m_0c^2 = 2.818 \cdot 10^{-13}$ cm, es el radio clásico del electrón .

$m_0c^2 = 0.511$ MeV, la energía en reposo del electrón .

$\tau \equiv T/m_0c^2$.

T es la energía cinética del electrón .

$$F(\tau) \equiv 1 - \beta^2 + \frac{(\tau^2/8) - (2\tau + 1) \cdot \text{Ln } 2}{(\tau + 1)^2}$$

δ es el término de corrección por el efecto de polarización (o de densidad) y es función de la composición y densidad del medio.

$U = 2C/Z$ es la corrección por el efecto de capa electrónica debido a la influencia de los electrones, de diferentes capas electrónicas, sobre el electrón incidente. Este factor de corrección depende del medio y de la velocidad del electrón, y afecta directamente a I , y por lo tanto al valor del poder de frenado.

Por otra parte, la fórmula del poder másico de frenado por radiación, que expresa la tasa de producción de bremsstrahlung por electrones, es:

$$\left[\frac{dT}{\rho dx} \right]_r = \sigma_0 \frac{NAZ^2}{A} (T + m_0c^2) \bar{B}_r \quad \text{ec. 4}$$

con:

σ_0 una constante, donde:

$$\sigma_0 = \frac{1}{137} (e^2/m_0c^2) = 5.80 \cdot 10^{-28} \text{ cm}^2/\text{átomo} .$$

\bar{B}_r es una constante que depende de Z y T , donde:

$$\bar{B}_r = \frac{16}{3} \dots \dots \dots T \ll 0.5 \text{ MeV} .$$

$$\bar{B}_r \cong 8 \dots \dots \dots T = 1 \text{ MeV} .$$

$$\bar{B}_r \cong 12 \dots \dots \dots T = 10 \text{ MeV} .$$

$$\bar{B}_r \cong 15 \dots \dots \dots T = 100 \text{ MeV} .$$

HOJA PARA EL CALCULO DEL FACTOR DE CALIBRACION DE LA CAMARA DE IONIZACION N_{gas} , SEGUN LA A.A.P.M. ((24), pág.765).

Nombre: ADRIAN ZAHORA FONSECA

página: 1/2

Fecha: 9 DE JUNIO DE 1990

ECUACION PARA EL CALCULO DEL FACTOR DE CALIBRACION:

$$N_{gas} = N_x \cdot \frac{K \cdot (W/e)_{air} \cdot A_{ion} \cdot A_{wall}}{\alpha \cdot \frac{wall}{(L/\rho)_{air}} \cdot \frac{cap}{(\mu en/\rho)_{air}} + (1-\alpha) \cdot \frac{wall}{(L/\rho)_{air}} \cdot \frac{cap}{(\mu en/\rho)_{cap}}}$$

Quando la pared de la cámara y el capuchón de equilibrio son del mismo material $\alpha = 1.00$. Cuando la pared de la cámara y el capuchón de equilibrio son de diferentes materiales, α se obtiene de la figura 15 pág. 62 (29), donde el espesor es tomado de la pág. 752 (99).

DATOS DE LA CAMARA DE IONIZACION.

Modelo de la cámara y número de serie: FARKER 2571, 1603

Longitud interna axial (p.752, (99)): 2.25 cm

Diámetro interno de la cavidad: 0.63 cm

Material de la pared y espesor: GRAFITO, 0.065 g/cm²
0.036 cm

Material del capuchón de equilibrio electrónico y espesor total de la pared más el capuchón: DELFIN, $t = 0.616$ g/cm²

$t = 0.423$ cm

Potencial de polarización: + 292 Vdc

CALIBRACION PARA Co-60.

Laboratorio de calibración y fecha: ACCREDITED DOSIMETRY CALIBRATION

LABORATORY, UNIVERSITY OF WISCONSIN, REPORT ION778; DEC. 15, 1969.

Factor de calibración para un haz de Co-60, a 22°C y 760 mmHg.

$N_x = 4.693 \cdot 10^9$ R/C

o $N_x =$ _____ R/div.

CONSTANTES.

Carga por unidad de masa de aire, por unidad de exposición:

$$k = \frac{2.58 \cdot 10^{-4}}{\text{C/kg R}}$$

Energía promedio por unidad de carga:

$$(W/e)_{\text{air}} = \frac{33.97}{\text{J/C}}$$

FACTORES DE CORRECCION EN EL PROCESO DE CALIBRACION .

Eficiencia de la colección de iones:

$$A_{\text{ion}} = \frac{0.999}{\text{-----}}$$

Porcentaje de atenuación y dispersión por unidad de espesor de la cámara (Tabla III):

$$\gamma = \frac{1.62}{\text{cm}^2/\text{g}}$$

Factor de corrección por pared:

$$A_{\text{wall}} = 1 - (\gamma/100) = \frac{0.990}{\text{-----}}$$

Fracción de ionización debida a los electrones de la pared de la cámara (fig. 15, p. 62 (25)):

$$\alpha = \frac{0.5}{\text{-----}}$$

Razón de los poderes de frenado pared/aire:

$$\text{Tabla I } \frac{\overline{(L/\rho)}_{\text{wall}}}{\text{air}} = \frac{1.010}{\text{-----}}$$

Razón de los coef. máxicos de absorción de energía aire/pared:

$$\text{Tabla I } \frac{\overline{(\mu_{\text{en}}/\rho)}_{\text{air}}}{\text{wall}} = \frac{0.999}{\text{-----}}$$

Fracción de la ionización debida a los electrones del capuchón de equilibrio electrónico:

$$(1-\alpha) = \frac{0.5}{\text{-----}}$$

Razón de los poderes de frenado capuchón/aire:

$$\text{página 753, nota (e), de (25)} \frac{\overline{(L/\rho)}_{\text{cap}}}{\text{air}} = \frac{1.087}{\text{-----}}$$

Razón de los coef. máxicos de absorción de energía aire/capuchón:

$$\text{página 753, nota (e), de (25)} \frac{\overline{(\mu_{\text{en}}/\rho)}_{\text{air}}}{\text{cap}} = \frac{0.937}{\text{-----}}$$

FACTOR DE CALIBRACION EN AIRE (a 22°C y 760 mmHg):

$$N_{\text{gas}} = \frac{40.13 \times 10^6}{\text{Gy/C}}$$

HOJA PARA EL CALCULO DEL FACTOR DE CALIBRACION DE LA CAMARA DE IONIZACION ND, SEGUN LA I.A.E.A. (123), pág. 80).

página: 1/2

Nombre: ADRIAN ZAHORA FONSECA

Fecha: 9 DE JUNIO DE 1990

CAMARA DE IONIZACION.

Modelo de la cámara: NEI. GUARDED FARMER 2571

Número de serie: 1603

Radio interno de la cavidad: 0.315 cm

Material de la pared: GRAFITO ($\rho=1.80$ g/cc)

Espesor: 0.065 g/cm²

Material del capuchón: DELFIN

Espesor: 0.551 g/cm²

DATOS DEL LABORATORIO DE CALIBRACION.

Laboratorio de calibración: ADCL, UNIVERSITY OF WISCONSIN ; USA

Fecha: REPORT 10N778, DEC. 15 1989.

Factor de calibración, establecido a $P_0 = \frac{1013}{760}$ mbar y $T_0 = 22$ °C.

$$N_x = \frac{1.21 \times 10^6}{4.693 \times 10^6} \text{ C/kg-div.}$$

$$\text{o } N_x = \frac{4.693 \times 10^6}{4.693 \times 10^6} \text{ R/div.}$$

Tensión de polarización: + 292 Vdc

Tamaño de campo: 10 x 10 cm²

Distancia fuente-cámara: 95 cm

CONSTANTES.

$W/e = 33.97$ J/C ; $g = 0.003$ (PARA Co-60)

DETERMINACION DE K_{att-Km} .

Fración de la ionización debida a electrones generados en la pared de la cámara (fig. 15, pag. 82 (23)):

$$\alpha = \frac{0.5}{1} = 0.5$$

Razón de los poderes de frenado aire/pared (Tabla XVII):

$$S_{air, \text{vall}} = \underline{0.998}$$

Razón de los coeficientes máxicos de absorción de energía pared/aire (Tabla XVII):

$$\overline{(\mu_{en}/\rho)}_{\text{vall, air}} = \underline{1.001}$$

$$S_{air, \text{vall}} \cdot \overline{(\mu_{en}/\rho)}_{\text{vall, air}} = \underline{0.999}$$

Fracción de la ionización debida a electrones del capuchón:

$$(1-\alpha) = \underline{0.5}$$

Razón de los poderes de frenado aire/capuchón (Tabla XVII):

$$S_{air, \text{cap}} = \underline{0.926}$$

Razón de los coeficientes máxicos de absorción de energía capuchón/aire (Tabla XVII):

$$\overline{(\mu_{en}/\rho)}_{\text{cap, air}} = \underline{1.068}$$

$$S_{air, \text{cap}} \cdot \overline{(\mu_{en}/\rho)}_{\text{cap, air}} = \underline{0.989}$$

$$K_m = \alpha \cdot S_{air, \text{vall}} \cdot \overline{(\mu_{en}/\rho)}_{\text{vall, air}} + (1-\alpha) \cdot S_{air, \text{cap}} \cdot \overline{(\mu_{en}/\rho)}_{\text{cap, air}}$$

$$K_m = \underline{0.994}$$

$$K_{att} = \underline{0.990}$$

(Tabla XVIII)

$$K_{att} \cdot K_m = \underline{0.984}$$

FACTOR DE CALIBRACION EN UNIDADES DE DOSIS ABSORBIDA EN AIRE:

$$N_b = N_x \cdot (1-g) \cdot K_{att} \cdot K_m = N_x \cdot (W/e) \cdot K_{att} \cdot K_m$$

$$N_b = \underline{40.45 \times 10^6} \text{ Gy/C}$$

N_x puede estar en C/kg·div. . Si N_x está en R/div, calcular:

$$N_x(\text{C/kg} \cdot \text{div}) = N_x(\text{R/div}) \cdot 2.58 \times 10^{-4} (\text{C/kg} \cdot \text{R})$$

HOJA PARA EL CALCULO DEL FACTOR DE CALIBRACION DE LA CAMARA DE IONIZACION ND, SEGUN LA S.E.F.M.(110), pág. B2)

página: 1/3

Fecha: 9 DE JUNIO DE 1990

Físico responsable: ADRIAN ZAHORA FONSECA

DATOS DE LA CAMARA DE IONIZACION.

Modelo: NEL GUARDED FARMER 2571

Número de serie: 1603

Longitud interna de la cavidad (axial): 2.25 cm

Radio interno de la cavidad: 0.315 cm

Material de la pared: GRAFITO

Espesor: 0.065 g/cm²

Material del capuchón de equilibrio electrónico: DELRIIN

Espesor: 0.551 g/cm²

Espesor total (X): 0.616 g/cm²

CALIBRACION PARA Co-60 .

Fecha: DFC. 15, 1989 ; ADCL UNIVERSITY OF WISCONSIN

Factor de calibración en unidades de exposición:

$N_x = N_x \cdot (R/div) \cdot 2.52 \times 10^{-4} (C/kg R) =$ 1.21×10^6 C/kg·div

Establecido a 22 °C y 760 mmHg .

Tasa de exposición: 14.0 R/min

Tamaño de campo: 10 x 10 cm²

Tensión de colección: + 292 Vdc

Punto de referencia de la cámara: CENTRO GEOMETRICO DEL VOLUMEN

ACTIVO DE LA CAMARA

CONSTANTES .

página: 2/3

Energía media por ión, por unidad de carga:

$$(W/e)_{\text{air}} = \underline{33.97} \text{ J/C}$$

Fracción de energía debida a la radiación de frenado en Co-60:

$$g = \underline{0.0032}$$

DETERMINACION DE K_m Y K_{air} .

Fracción de electrones generados en la pared de la cámara (Fig. 15 Pág. 62 (29)):

$$\alpha = \underline{0.5}$$

Razón de los poderes de frenado aire/pared (Tabla 4.1 (36)):

$$S_{\text{air, vall}} = \underline{0.998}$$

Razón de los coeficientes máxicos de absorción de energía pared/aire (Tabla 4.1 (36)):

$$\overline{(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{vall, air}}} = \underline{1.001}$$

$$S_{\text{air, vall}} \cdot \overline{(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{vall, air}}} = \underline{0.999}$$

Fracción de electrones generados en el capuchón de equilibrio:

$$(1-\alpha) = \underline{0.5}$$

Razón de los poderes de frenado aire/capuchón (Tabla 4.1 (36)):

$$S_{\text{air, cap}} = \underline{0.926}$$

Razón de los coeficientes máxicos de absorción de energía capuchón/aire (Tabla 4.1 (36)):

$$\overline{(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{cap, air}}} = \underline{1.068}$$

$$S_{\text{air, cap}} \cdot \overline{(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{cap, air}}} = \underline{0.989}$$

$$K_m = \alpha \cdot S_{\text{air, vall}} \cdot \overline{(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{vall, air}}} + (1-\alpha) \cdot S_{\text{air, cap}} \cdot \overline{(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{cap, air}}}$$

$$K_m = \underline{0.994}$$

Factor de atenuación y dispersión en espesor total (Tabla 4.2):

$$\gamma = \frac{0.0162}{\text{cm/g}}^2$$

$$\text{(Tabla 4.3b (c))}: K_{aa} = (1 - \gamma \cdot X_t) = \underline{0.990}$$

FACTORES DE CORRECCION EN EL PROCESO DE CALIBRACION .

$$\text{Corrección por saturación (páginas 63, 64) } (K_a)_c = \underline{1.001}$$

$$\text{Corrección por efecto de tallo: } (K_{at})_c = \underline{1.0}$$

FACTOR DE CALIBRACION EN UNIDADES DE DOSIS ABSORBIDA, EN EL AIRE DE LA CAVIDAD .

$$N_D = N_X \cdot (W/e) \cdot K_m \cdot K_{aa} / (K_a)_c \cdot (K_{at})_c ; \text{ establecido a } \underline{1013} \text{ mbar y } \underline{22} \text{ } ^\circ\text{C:}$$

$$N_D = \underline{40.41 \times 10^6} \text{ Gy/C}$$

ANEXO 3

EJEMPLOS PARA EL LLENADO DE LAS HOJAS PARA EL CALCULO DE LA DOSIS ABSORBIDA EN AGUA, PARA ELECTRONES DE 7 MeV.

Con el fin de mostrar el procedimiento en el llenado de las hojas para el cálculo de dosis, se presentan las hojas de cálculo de dosis para cada protocolo en la energía de 7 MeV. Detalles sobre el llenado y la adquisición de otros resultados de las hojas se pueden encontrar en el capítulo 2.

HOJA DE TRABAJO PARA EL CALCULO DE DOSIS EN AGUA PARA HACES DE ELECTRONES, SEGUN LA A.A.P.M.

página: 1/2

DATOS GENERALES

Nombre: ADRIAN ZAHORA FONSECA Fecha: 9 DE JUNIO DE 1990

Fuente de radiación: HEVATRON K-74 Energía nominal: 7 MeV

GEOMETRIA

Material del fantoma (med): AGUA SSD: 100 cm

Tamaño de campo del colimador: 10 x 10 cm²

Profundidad de medida: 1.4 cm

PARAMETROS DEL HAZ

dso: 2.6 cm de agua. Energía media incidente (\bar{E}_0): 6.1 MeV

donde $\bar{E}_0 = 2.99 \times dso$. Alcance práctico (Rp): 3.4 cm

Energía media a la profundidad de medida $\bar{E}_z \approx E_0(1 - (z/Rp))$:

$\bar{E}_z =$ 3.6 MeV

ECUACION DE DOSIS POR UNIDAD MONITOR :

$$D_{water}/U = (M/U) \cdot N_{gas} \cdot (CL/\rho)_{air} \cdot \overset{water}{\cdot P_{ion}} \cdot Prepl$$

donde U se refiere a las unidades monitor del acelerador.

FACTORES AMBIENTALES

Temperatura T = 23.9 °C y Presión P = 717 mmHg en el momento de las mediciones. La señal M de la cámara es normalizada a 22°C y una atmósfera de Presión, usando el factor:

$$\frac{(T + 273^\circ C) \cdot 760 \text{ mmHg}}{295^\circ C \cdot P} = \underline{1.067}$$

Promedio de la señal de la cámara por unidad monitor (con el mayor potencial colector), incluyendo la corrección ambiental:

$(M/U) =$ 0.230×10^{-9} Coulomb/U

o $(M/U) =$ _____ div. escala/U

CARACTERÍSTICAS DE LA CÁMARA DE IONIZACIÓN

Modelo de la cámara: FARMER 2571 diámetro interno: 6.3 mm

Factor de calibración para el gas de la cámara :

$$N_{\text{gas}} = \underline{40.13 \times 10^6} \text{ Gy/Coulomb}$$

FACTORES DE CORRECCION

Razón de poderes de frenado en profundidad para \bar{E}_0 :

$$\text{Tabla V. } \left(\frac{\text{valor}}{\rho_{\text{air}}} \right) = \underline{1.075}$$

Factor de corrección por recombinación de iones:

$$\text{Fig. 4. } P_{\text{ion}} = \underline{1.013}$$

Factor de corrección por reemplazamiento:

$$\text{Tabla VIII. } P_{\text{repl}} = \underline{0.959}$$

DOSIS EN AGUA POR UNIDAD MONITOR EN d_{max} :

$$D_{\text{water}(d_{\text{max}})} / U = \underline{9.64 \times 10^{-3}} \text{ Gy/U}$$

HOJA DE TRABAJO PARA EL CALCULO DE DOSIS EN AGUA PARA HACES DE ELECTRONES, SEGUN LA I.A.E.A.

página: 1/2

DATOS GENERALES

Nombre: ADRIAN ZAHORA FONSECA Fecha: 9 DE JUNIO DE 1990

Unidad de radioterapia: MEVATRON X-74 Energía Nominal: 7 MeV

GEOMETRIA

Profundidad del punto efectivo de medida:

($Z_{\text{peff}} - Z_{\text{peff},0}$): 1.4 cm

Tamaño de campo: 10 x 10 cm² a SSD = 100 cm

Tasa de dosis nominal del acelerador: 300 unidades monitor/min

CARACTERISTICAS DE LA CAMARA DE IONIZACION

Modelo y número de serie: NEL FARMER 2571, 1603

Radio interno: 3.15 mm

Material de la pared y espesor: GRAFITO, 0.065 g/cm²

Factor de dosis absorbida para el aire de la cámara:

$N_D =$ _____ Gy/div

o $N_D =$ 40.45×10^6 Gy/C, dado a $P_0 =$ 101.3 kPa, $T_0 =$ 22 °C y 50%

de humedad relativa (HR).

Voltaje de polarización: -300 Vdc

Cambio en la respuesta, comparada con la de la fecha de

calibración, derivado con una fuente radiactiva: ALREDEDOR DEL

1% DESDE LA FECHA DE CALIBRACION

Corrección de la lectura del electrómetro:

Valor promedio de las lecturas corregidas por fuga y polaridad:

$M_u^* =$ _____ div/u.m.

o $M_u^* =$ 0.215×10^{-9} C/u.m.; unidades monitor: 100 u.m.

FACTORES AMBIENTALES

Presión, $P = 95.57$ kPa Temperatura, $T = 23.9$ °C

$$P_{TP} = \frac{P_0 (273.2+T)}{P (273.2+T_0)} = \frac{101.3 \times 297.1}{95.57 \times 295.2} = 1.067$$

Corrección humedad: $K_h = 1.00$

Corrección por recombinación:

 $V_1 = -300$ Vdc $V_2 = -150$ Vdc $M_1/M_2 = 1.014$ $\{a_0 = 2.337, a_1 = -3.636, a_2 = 2.299$ de tabla IX $\} P_B = 1.014$ $M_u = M_u^* \cdot P_{TP} \cdot K_h \cdot P_B = \dots$ div/u.m. o 0.233×10^{-9} C/u.m.

PARAMETROS DEL HAZ

Alcances obtenidos por medidas a SSD = 100 cm con curvas de dosis absorbida o de ionización en profundidad a SSD = 1 m $R_{50} = 2.6$ cm $R_p = 3.4$ cmMaterial del fantoma: AGUA

Energía más probable en la superficie:

 $E_{p,0} = 0.22 + 1.08 R_p + 0.0028 R_p^2$ $E_{p,0} = 7.0$ MeVEnergía media en la superficie, tabla IV: $\bar{E}_0 = 6.0$ MeV $Z/R_p = 0.41$ Tabla V: $\bar{E}_z/\bar{E}_0 = 0.526$ Energía media a profundidad ($z = 1.4$ cm): $\bar{E}_z = 3.2$ MeV

FACTORES DE CORRECCION

Razón de poderes de frenado agua/aire:

Tabla X... $S_{v,air} = 1.075$

Factor de perturbación:

Tabla XI... $P_u = 0.958$

Factor por el efecto del electrodo central

 $P_{cel} = 1.008$

ECUACION DE DOSIS

 $D_{water}(Perf) = M_u \cdot N_D \cdot S_{v,air} \cdot P_u \cdot P_{cel} = 9.78 \times 10^{-3}$ Gy/U

HOJA DE TRABAJO PARA EL CALCULO DE DOSIS EN AGUA PARA HACES DE ELECTRONES, SEGUN LA S.E.F.M.

página: 1/2

DATOS GENERALES

Físico responsable: ADRIAN ZAMORA F. Fecha: 9 DE JUNIO DE 1990

Unidad de radiación: HEVATRON K74 Energía Nominal: 7 MeV

GEOMETRIA

Profundidad en agua del punto de calibración (z): 1.4 cm

Profundidad del punto de referencia de la cámara: 1.6 cm

Tamaño de campo: 10 x 10 cm² a DFS= 100 cm

Tasa nominal de dosis del acelerador: 300 u.m./min

DATOS DE LA CAMARA DE IONIZACION:

Modelo: FARHER 2571 número de serie: 1603

Radio interno: 0.315 cm Espesor de la pared: 0.065 g/cm²

Factor de dosis absorbida en el aire de la cavidad:

$N_D =$ _____ Gy/div.

o $N_D =$ 40.41×10^6 Gy/C

establecido a: $P_0 =$ 1013 mbar, $T_0 =$ 22 °C y 50 :4HR

Tensión de colección: -300 Vdc

Lecturas con fuente de comprobación de estabilidad, respecto a la fecha de calibración: ALREDEDOR DEL 1%

Lectura corregida del electrómetro, $M_u =$ _____ div/u.m.

o $M_u =$ 0.215×10^{-9} C/u.m.

unidades monitor = 100 u.m.

FACTORES AMBIENTALES

Temperatura $\theta =$ 23.9 °C Presión $P =$ 956 mbar

$$p(P, \theta) = \frac{1013}{P} \frac{273.2 + \theta}{295.2} = \frac{1013 \times 297.1}{956 \times 295.2} = 1.066$$

Factor de corrección por humedad:

$$K_h = \frac{1.0}{\quad}$$

Corrección por saturación:

$$(K_{at})_u = \frac{1.00}{\quad}$$

$$V_1 = \frac{-300}{\quad} \text{ Vdc}$$

$$V_2 = \frac{-150}{\quad} \text{ Vdc}$$

$$M_1/M_2 = \frac{1.014}{\quad}$$

Figura C.2a , p. 58

$$(K_e)_u = \frac{1.014}{\quad}$$

Lectura corregida:

$$M_u^* = M_u \cdot \rho(P, \theta) \cdot K_h \cdot (K_{at})_u \cdot (K_e)_u = \quad \text{div/u. m.}$$

$$\text{o } M_u^* = \frac{0.232 \times 10^{-9}}{\quad} \text{ C/u. m.}$$

PARAMETROS DEL HAZ

Alcances a partir de medidas a DFS = 1 m sobre curvas de :
ionización o dosis absorbida

$$R_{50} = \frac{2.6}{\quad} \text{ cm}$$

$$R_p = \frac{3.4}{\quad} \text{ cm}$$

Material del fantoma utilizado: AGUA

Energía más probable en superficie:

$$E_{p,0} = 0.22 + 1.98 \cdot R_p + 0.0025 \cdot R_p^2$$

$$E_{p,0} = \frac{7.0}{\quad} \text{ MeV}$$

Energía media en superficie, tabla 5.2 :

$$\bar{E}_0 = \frac{6.0}{\quad} \text{ MeV}$$

$$z/R_p = \frac{0.41}{\quad}$$

Tabla 5.3: $\bar{E}_z/\bar{E}_0 = \frac{0.526}{\quad}$

Energía media en profundidad (z = $\frac{1.4}{\quad}$ cm) :

$$\bar{E}_z = [\bar{E}_z/\bar{E}_0] \cdot \bar{E}_0$$

$$\bar{E}_z = \frac{3.2}{\quad} \text{ MeV}$$

FACTORES DE CORRECCION

Razón de poderes de frenado agua/aire, tabla 6.3 (actualizada en el suplemento de éste protocolo (ad)) $S_{v,air} = \frac{1.075}{\quad}$

Factor de perturbación por fluencia, tabla 6.4: $P_f = \frac{0.956}{\quad}$

Factor de corrección por desplazamiento:

$$P_d = \frac{1.0}{\quad}$$

Factor de perturbación por pared:

$$P_{vall} = \frac{1.0}{\quad}$$

Factor de corrección por efecto del electrodo: $P_{cel} = \frac{1.008}{\quad}$

ECUACION DE DOSIS:

$$D_v = M_u^* \cdot N_D \cdot S_{v,air} \cdot P_f \cdot P_d \cdot P_{vall} \cdot P_{cel} = \frac{9.73 \times 10^{-3}}{\quad} \text{ Gy/u. m.}$$