

APLICACIONES MEDICAS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES

RADIOTERAPIA

M. C. PAREDES

INTRODUCCION

Si bien RADIOTERAPIA significa, etimológicamente, tratamiento con radiaciones en su sentido más amplio, en la realidad se aplica este nombre a una especialidad médica que se ocupa del tratamiento de determinadas enfermedades —fundamentalmente oncológicas— por medio de radiaciones ionizantes.

Los orígenes de la Radioterapia se remontan a principios de este siglo, a los años que siguieron, tanto al descubrimiento de los Rx por Röntgen, como al descubrimiento del Radio por los esposos Curie.

Desde las simples aplicaciones de una fuente de Radio a la piel, de los años diez, hasta los sofisticados tratamientos que se realizan ahora, han mediado setenta años de incesantes e intensas investigaciones médicas, biológicas, físicas y técnicas que permiten conocer con mucha precisión los medios de que se dispone y los resultados que se espera obtener de ellos.

La Radioterapia de alta energía que se aplica hoy está considerada como un procedimiento de alta tecnología.

De una forma esquemática se podría hacer un resumen de la cronología de la Radioterapia:

- Radioterapia inicial con Radio y simples aparatos de Rx. Desde 1910 a 1930.
- Radioterapia convencional Rx de hasta 400 KV. Desde 1930.
- Radioterapia de alta energía Cobalto-60. Desde 1950.
- Radioterapia de alta energía Aceleradores 1960 —Betatrones.
- Radioterapia de acelerador Lineal — 1960-1970.
- Empleo ordenadores para control de equipos y dosimetría 1970-1980.
- Empleo partículas de alto LET — 1980.

La Radioterapia es un procedimiento que compete en igualdad de condiciones con la quimioterapia, la cirugía y la inmunología en el tratamiento de tumores malignos.

Los tumores malignos tienen las características siguientes:

- Son agrupaciones de células, tejidos, que crecen de forma incontrolada, infiltrando y destruyendo tejidos sanos donde se insertan.
- Pueden formar metástasis a distancia, es decir, tumores semejantes al primario en zonas alejadas de él, por desplazamiento de células tumorales a través de vía hemática y/o linfática.
- Pueden recaer después de un tratamiento y la probabilidad de que esto ocurra depende del número de células viables o capaces de proliferar que quedan sin destruir durante el tratamiento.

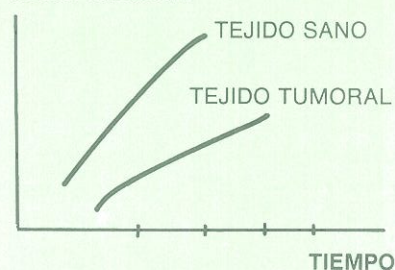
Las radiaciones ionizantes destruyen las células tumorales pero también pueden destruir las células sanas donde aquéllas se asientan o las circundan. *La meta de la Radioterapia es llevar la máxima dosis de radiación posible a las células tumorales, con un mínimo de dosis a los tejidos circundantes.* Ello requiere un conocimiento amplio de los procesos de interacción de las radiaciones con la materia viva y la respuesta de ésta a las radiaciones ionizantes, y a la vez la posibilidad de barajar distintas técnicas de irradiación que permitan administrar la dosis con un reparto adecuado en el espacio y en el tiempo.

FUNDAMENTOS BIOLOGICOS DE LA RADIOTERAPIA

Los tejidos vivos normales se regeneran mediante un equilibrio dinámico entre las cantidades de células que nacen

M.^a CRUZ PAREDES es Licenciada en Ciencias Físicas por la Universidad Complutense de Madrid y Físico de Hospital. Desde 1964, es encargada de la Sección de Radiofísica de la Clínica Puerta de Hierro de Madrid.

RECUPERACION



F I Regeneración de tejidos tras la destrucción de células por irradiación

y las que mueren, siendo muy distinta la velocidad con que se producen ambos procesos, en los distintos tejidos del organismo. Si este equilibrio se rompe por una destrucción anormal, tienen lugar fenómenos de *Regeneración* acelerada con el fin de recuperar el equilibrio.

Los tejidos tumorales crecen anárquicamente, y tampoco se regeneran de forma reglada; no se ajustan al equilibrio dinámico de los tejidos donde se asientan; su recuperación es más lenta que la de los tejidos sanos. En la figura I se compara, de forma esquemática, la regeneración del tejido sano y el tumoral, tras la destrucción de células por la irradiación.

Este fenómeno está contemplado en las leyes de Bergonie y Tribondeau que establecen que la sensibilidad de los tejidos a las R.I. (radiaciones ionizantes) está relacionada con la actividad mitótica y el grado de diferenciación celular.

De aquí se puede deducir alguna conclusión: cuando se irradian tejidos sanos junto a los tumores, conviene suministrar la *dosis* de manera *fraccionada* para dar tiempo a los tejidos sanos a la repoblación y a la reparación de daños subletales.

Dentro del ciclo celular, las fases más radiosensibles son la G₂ y la de mitosis; en este sentido se ensayan los fraccionamientos oportunos para tratar de llegar a las células tumorales en la fase más sensible de su ciclo.

Por último, es interesante resaltar que el grado de oxigenación de las células influye también en la sensibilidad a las radiaciones ionizantes. Las células hipoxicas (poco oxigenadas) son resistentes a las Radiaciones Ionizantes de bajo TLE (transferencia lineal de energía), término más conocido por sus siglas en inglés: LET *linear energy transfer*, como los fotones o electrones. El tejido sano, en general, está más oxigenado que el tejido tumoral. Se han descrito algunos modelos de degeneración de los tejidos debido a los tumores,

F II Modelo de degeneración de tejidos

que representamos en la figura II. Al crecer el tumor se forman zonas necróticas anóxicas de células no viables, zona 1 de la figura, alrededor de ellas se forma una zona 2 de células poco oxigenadas resistentes a la radiación, pero viables si se oxigenan, y alrededor de ésta se forma una capa 3 de células viables, que están bien oxigenadas y que son las más radiosensibles. La irradiación con fotones o electrones puede aniquilar las células de esta zona 3, pero las de la zona 2, que por hipóxicas son más resistentes a las RI, al ser eliminadas las de la zona 3, pueden oxigenarse y proliferar dando lugar a *RECIDIVAS* tumorales. Para eliminar con una sola dosis de radiaciones de bajo LET estas células hipóxicas, la dosis necesaria sería tan elevada que habría que sobrepasar la dosis de tolerancia de los tejidos sanos. La eliminación de las células hipóxicas de la zona 2 plantea diversas opciones:

- La primera de ellas es utilizar radiaciones de alto LET de partículas pesadas (protones, neutrones, alfa) que pueden alcanzar las zonas hipóxicas que además son menos resistentes a estas RI (Fig. 3). Ahora bien, la irradiación con estas partículas que supone el empleo de equipos muy costosos, como ciclotrones, está en fase experimental y sólo se realiza en contados lugares del mundo.
 - La segunda es aumentar la oxigenación de la región 2 durante el tratamiento.
 - La tercera es buscar el *fraccionamiento* y *protracción* adecuados.
- Los fenómenos biológicos de respuesta de las células y tejidos a la acción de las Radiaciones Ionizantes y al desarrollo tumoral podemos resumirlos de forma muy esquemática en cuatro fases: *regeneración* del tejido, *reparación* de daños subletales, *redistribución* de las fases del ciclo celular y *reoxigenación* de las células hipóxicas. Tratar de acoplarse a estos fenómenos biológicos, mediante la técnica radiante más adecuada, que será la que me-

jor elija la energía, la fuente, la distribución en el tiempo y en el espacio, es la meta de la Radioterapia.

La técnica radiante elegida será óptima cuando proporcione la mayor probabilidad de control y eliminación del tumor, junto con la mínima probabilidad de generar efectos secundarios.

CLASIFICACION DE LA RADIOTERAPIA

Las distintas formas de hacer radioterapia se pueden agrupar de acuerdo a distintos parámetros.

- Por la fuente de radiación empleada:
 - Equipos de radiación: Terapia de contacto - Rx.
 - Terapia convencional Rx.
 - Aceleradores de e⁻ circulares y lineales.
 - Aceleradores de otras partículas.
 - Ciclotrones.
- Fuentes radiactivas: Terapia superficial ⁹⁰Sr.
- Curiterapia ²²⁶Ra, ¹⁹²Ir, ¹³⁷Cs.
- Telegammaterapia ¹³⁷Cs y ⁶⁰Co.
- Por la energía de las radiaciones utilizadas

F III Efecto comparativo del comportamiento de las células ante radiaciones de alto y bajo LET



Radiación de bajo LET



Radiación de alto LET

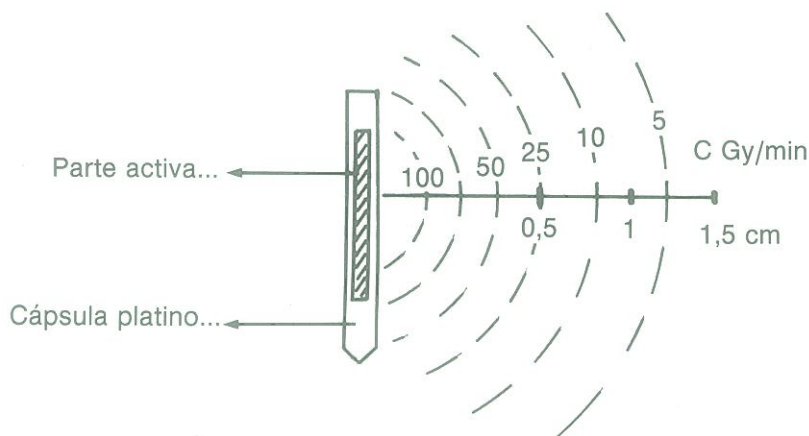
- Baja energía: Rx de menos de 100 kV. Radioterapia superficial o de contacto.
- Energía Media: Rx desde 100 kV hasta 400 kV. Radioterapia convencional. Isótopos como ^{137}Cs , ^{192}Ir . Curiterapia.
- Alta energía: Telegammaterapia de ^{60}Co ; terapia con fotones y electrones procedentes de Aceleradores; terapia con haces de partículas de alto LET.
- Por la calidad y características de las radiaciones:

En este apartado se pueden separar dos clases fundamentales, la irradiación con partículas, electrones (e^-), protones (p), neutrones (n) y la irradiación con haces de radiación electromagnética: fotones gamma o X.

- Por la distancia entre la fuente y los tejidos irradiados, se puede clasificar la radioterapia en tres grupos:

- Terapia de contacto. La fuente está en contacto con los tejidos o incluso dentro de ellos.
- Terapia superficial. La fuente siempre externa, bien sea un equipo de Rx o un isótopo radiactivo como el ^{90}Sr , se pone en contacto con la piel en la zona lesionada.
- Curiterapia intracavitaria. Las fuentes, siempre isótopos radiactivos como el ^{60}Co , ^{226}Ra , ^{137}Cs , ^{192}Ir , por ejemplo, se introducen en cavidades naturales, como útero, vagina, recto, etc. y se colocan en contacto con las mucosas que recubren estas cavidades.
- Curiterapia intersticial. Las fuentes, siempre isótopos radiactivos, generalmente en forma de agujas, horquillas o granos, se introducen en los mismos tejidos.
- Plesioterapia o terapia de distancia corta. Es una radioterapia que se hace generalmente con equipos de rayos X y que la distancia entre la fuente y la piel está comprendida entre 10 cm y 50 cm.
- Teleterapia: se hace con haces de radiación electromagnética γ o X, o haces de partículas, e^- , n , para distancia fuente-piel (DFP) mayor de 50 cm. La DFP más frecuente está comprendida entre 80 y 100 cm, aunque actualmente se realizan técnicas especiales de grandes campos, como la irradiación de medio cuerpo o de cuerpo total, que precisan distancias mayores, tales como 2, 3 ó 4 m.

Actualmente se está empezando a utilizar en clínica una técnica especial que podría incluirse en la plesio o teleterapia, la *terapia intraoperatoria*, que se hace generalmente con haces de e^- de



F IV Esquema de acción de la Braquiterapia o Curiterapia

los aceleradores y consiste en la introducción del haz o del colimador en el mismo tumor, que se abre al exterior mediante un acto quirúrgico realizado en la misma sala de tratamiento de los Aceleradores.

Como se puede deducir de lo que precede, existe una gran variedad de técnicas radioterápicas que exigen tratamiento completamente distinto, tanto en instalaciones como en dosimetría y utilización.

TECNICAS DE RADIOTERAPIA

Siempre con el fin de buscar un resultado óptimo de la Radioterapia, pasamos a describir las distintas técnicas y ver qué ofrece cada una de ellas.

De todas las clases de radioterapia enumeradas en el apartado anterior, se pueden extraer dos que dan lugar a procedimientos esencialmente distintos, que son la braquiterapia o curiterapia y la teleterapia.

BRAQUITERAPIA O CURITERAPIA

Braquiterapia es la expresión sajona y su origen está en el griego *braqui* que significa próximo. Curiterapia es nombre de origen francés y es un homenaje a los esposos Curie. Mediante la curiterapia, que consiste, como ya se ha dicho, en la inclusión de fuentes radiactivas en las cavidades, o la inserción en los tejidos, se consigue en buena medida la irradiación intensa de un volumen reducido a costa de irradiar muy poco los tejidos sanos próximos al tumor. El gradiente de dosis que es muy grande en la inmediata vecindad de la fuente radiactiva, decrece a medida que nos alejamos de ella tal como se ve en la figura IV.

La terapia superficial, que consiste en colocar una fuente en contacto o muy próxima a la piel, se hace fundamentalmente con Estroncio-90 en equilibrio radiactivo con Itrio-90. Se aprovecha para terapia la emisión beta de 0,546 MeV del Sr-90 y de 2,25 MeV del Y-90. También existen equipos de Rx de terapia de contacto que funcionan con tensión inferior a 50 kV. Esta terapia se emplea para lesiones cutáneas de volumen reducido. Las lesiones cutáneas de volumen mayor se tratan con haces de electrones producidos en aceleradores.

La curiterapia endocavitaria utiliza el ^{137}Cs , el ^{226}Ra , el ^{60}Co y el ^{192}Ir , como fuentes radiactivas, generalmente en forma de tubos. Entre ellos, el más frecuente es el ^{137}Cs ; sus características de energía 0,66 MeV, período de semidesintegración treinta años, tasa de exposición de 3,3 R/h, a 1 cm mCi^{-1} , son las más adecuadas para esta clase de tratamientos.

El ^{226}Ra , que fue el único elemento que se usaba al principio, hoy apenas se emplea y la tendencia es a retirarlo del uso clínico porque presenta problemas, entre los que resalta la posibilidad de producir contaminación por Radon-222.

Esta clase de terapia se emplea fundamentalmente en tumores ginecológicos, se utiliza sólo o en combinación con teleterapia. También se aplica a otras localizaciones como fosas nasales, cavidad oral, recto, pero su uso es mucho menos frecuente.

La curiterapia intersticial emplea el ^{192}Ir como isótopo más frecuente, en forma de hilos y horquillas. El ^{192}Ir tiene una emisión gamma de 0,318 MeV, un período de semidesintegración de setenta y cinco días y una tasa de exposición de 4,8 R/h a 1 cm mCi^{-1} , su aplicación es relativamente sencilla y la

maleabilidad de las fuentes permite acoplarse a la anatomía. Cualquier localización accesible puede ser tratada con radioterapia intersticial, pero las más frecuentes son lengua, regiones ganglionares cervicales, labio, mucosa de la cavidad bucal, mama, etc.; al igual que la curiterapia intracavitaria, se puede usar sólo o en combinación con teleterapia.

Merece mención también la curiterapia con implantes permanentes que se hace generalmente con Iodo 125 y Oro 198. Consiste en la colocación de semillas de la fuente radiactiva en la zona o tejido que se pretende irradiar y dejarlas allí de forma permanente. La dosimetría de estas aplicaciones no resulta fácil por la dificultad de reproducir la geometría de la aplicación y la posibilidad de que se muevan.

La dosimetría en todas las aplicaciones de curiterapia, que consiste en conocer la distribución de la dosis de radiación depositada alrededor de las fuentes, requiere el conocimiento exacto de la situación de las fuentes radiactivas en el espacio, con referencia a puntos anatómicos concretos. Para ello se precisan radiografías ortogonales y un estudio minucioso de la localización de todas y cada una de las fuentes. La introducción de los ordenadores en los Servicios de Radioterapia durante la década de los sesenta, supuso una gran ayuda en esta tarea, ya que por procedimientos manuales sólo se podría determinar la dosis en determinados puntos. Una buena práctica de curiterapia exige la colocación de las fuentes de acuerdo con unos modelos geométricos, marcados por los distintos sistemas de dosimetría, que garantizan una distribución adecuada de la dosis sin puntos calientes ni fríos.

La curiterapia presenta un problema de protección fundamental, que es el riesgo que se deriva del manejo de fuentes radiactivas de varios mCi; actualmente este riesgo se ha disminuido mucho con el empleo de técnicas diferidas de aplicación, que consisten en hacer los implantes en dos tiempos: en el primero, el que más tiempo lleva, se colocan los aplicadores no radiactivos, se hacen los controles necesarios con radiografías, y una vez comprobada la correcta colocación de los aplicadores, se colocan las fuentes en un segundo tiempo que es mucho más rápido. También existen sistemas automáticos de carga diferida que reducen el riesgo de exposición de los manipuladores casi a cero.

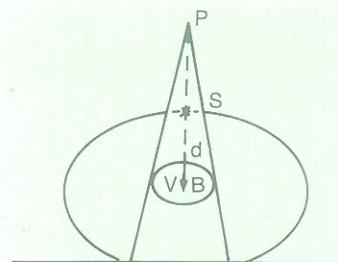
PLESIOTERAPIA

Es terapia con Rx en la que la DFP está comprendida entre 5 y 50 cm, es una transición entre la curiterapia y la teleterapia y hoy casi no se emplea.

TELETERAPIA

Cuando los tumores que se quieren irradiar no están asequibles a las aplicaciones de curiterapia, porque se encuentren a varios cm de profundidad por debajo de la piel, hay que acudir a la teleterapia, por otro lado, la técnica más generalizada. La teleterapia consiste en la irradiación de un volumen de tejidos situado a una determinada profundidad por debajo de la piel, mediante la incidencia de uno o varios haces de radiación, cuya fuente está situada a una distancia S de la piel y a una distancia S + d del tumor (Fig. V). Las características de la teleterapia en relación con la curiterapia son las siguientes:

- La distribución de dosis en el espacio no es tan concentrada, pero puede hacerse mucho más homogénea que en curiterapia; dentro del volumen blanco se consigue que la variación de dosis sea <10%.
- La distribución de dosis en el tiempo también tiene un esquema completamente distinto que en curiterapia. Mientras que en ésta se da una dosis de forma continua a lo largo de unas cuantas horas o días, a una tasa no demasiado alta, de unos 50 cGy/hora, en teleterapia se proporciona una dosis a una tasa bastante más alta, de unos 100 ó 200 cGy/min pero se distribuye a lo largo de un tiempo mucho



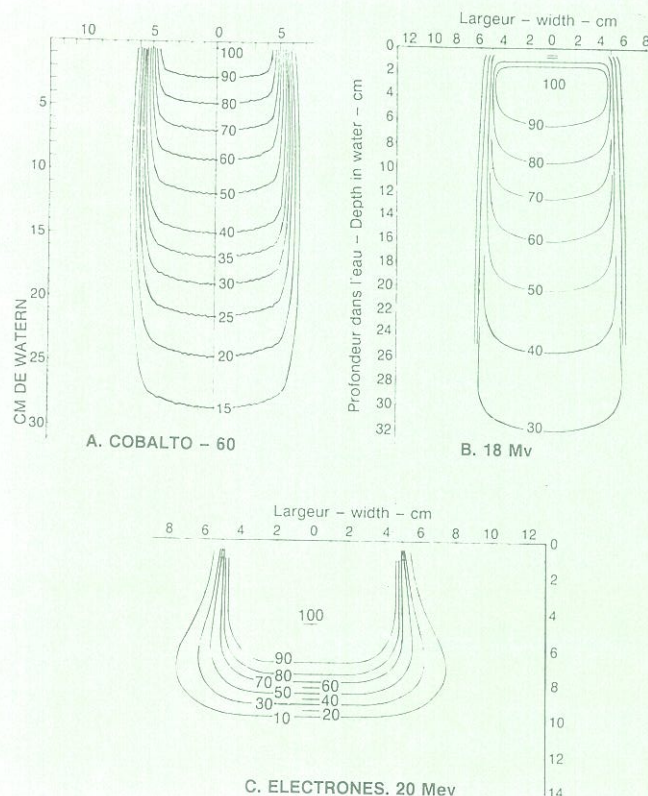
P: fuente
S: DFP
d: profundidad del tumor
(S + d) = Distancia fuente tumor DFT

F V Contorno transversal con delimitación del volumen blanco (VB)

más largo, de varias semanas, al ritmo de una, dos o tres sesiones diarias de duración muy corta, de uno a cinco minutos. Esta clase de fraccionamiento favorece la recuperación biológica de los tejidos, así como la oxigenación de células tumorales hipóxicas, proceso que tiene lugar en los periodos inter-sesiones.

- Los volúmenes irradiados con teleterapia son, en general, mayores que los que se irradian con curiterapia. La irradiación con teleterapia cubre volúmenes que van desde unos cuantos cm³ (los cubiertos por haces con secciones

F VI Haz γ de ⁶⁰Co, haz Rx de 18 MV y haz de e⁻ de 20 MeV



planas –campo de irradiación– de $5 \times 5 \text{ cm}^2$), hasta la irradiación del cuerpo completo.

- La distribución de dosis dentro de los tejidos, para los tratamientos de teleterapia, es una función de la clase de radiación X, gamma o α , β , γ , etc.; de la energía de la radiación; de la distancia fuente-tejido; del tamaño de los campos empleados; de las características del equipo que produce la radiación, y de la técnica empleada, entre otros.

- Los haces de radiación de teleterapia se atenúan cuando entran en los tejidos, dando el máximo en la piel, o a unos mm o cm por debajo de ella a medida que la energía de la radiación crece. La figura VI representa un haz gamma de ^{60}Co , un haz de Rx de 18 MV, un haz de electrones 20 MeV. Como se puede apreciar, la distribución de dosis es completamente distinta en cada uno de ellos. Los haces de fotones de alta energía (a partir de 1 MeV) presentan la ventaja de que el máximo no está en la piel sino a unos mm o cm por debajo; esto hace de protección, evita las lesiones cutáneas que se producían con los haces de Rx de ortovoltaje, y permite llevar dosis mayores a tejidos más profundos. Los haces tienen menor penumbra y permiten la irradiación de tumores profundos de forma más homogénea, produciendo menos dosis integral. Por todas estas razones, la radiación de Rx de hasta 300 kV hoy día está prácticamente en desuso; ya no se montan equipos de Rx de terapia convencional (hasta 300 kV).

- Las ventajas de la radiación de alta energía frente a la de energía media son evidentes, pero también hay límites en la alta energía.

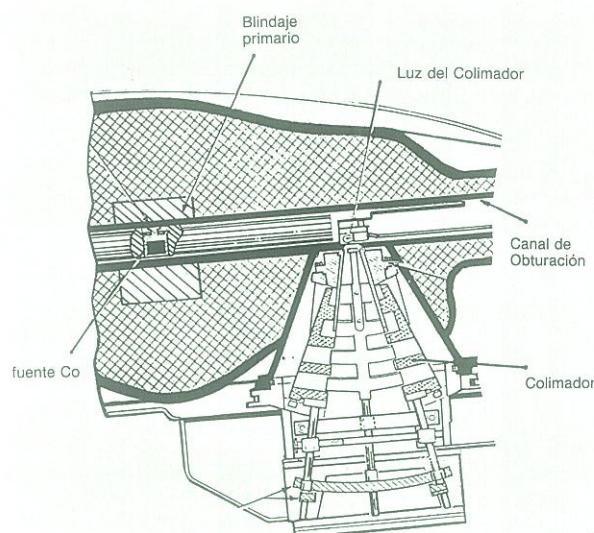
- Durante los años sesenta se desarrollaron aceleradores de e^- circulares y lineales que producían haces de fotones de 40 MV y de electrones de 30 MeV; hoy se ha demostrado que estas energías tan altas no proporcionan ventajas sobre los haces de 10 a 20 MV de fotones y a cambio los equipos son más sofisticados y mucho más costosos; por tanto, en la actualidad no se fabrican aceleradores de más de 20 ó 25 MV de fotones. También han dejado de fabricarse los betatrones para usos médicos, ya que se ha demostrado que los aceleradores lineales son más versátiles.

EQUIPOS DE RADIACION

UNIDADES DE TELEGAMMATERAPIA

La parte fundamental de estos equipos es la fuente radiactiva, que general-

F VII Cabeza y colimador de una unidad de telecobaltoterapia. Theratron –780–, Cobalt Unit Operator's Manual Atomic Energy of Canada Limited.



mente es de ^{60}Co , aunque también los hay con fuente de ^{137}Cs .

El ^{60}Co emite dos radiaciones gamma de 1,17 y 1,33 MeV; tiene un período de semidesintegración de 5,3 años y produce una tasa de exposición de 13,2 R/h a 1 cm mCi^{-1} . La fuente de ^{60}Co es un disco con diámetro variable de 0,75 a 2,5 cm y un espesor de 0,5 a 2 mm. La fuente va encerrada en una cápsula de acero inoxidable que tiene una doble función, por un lado absorbe la radiación β ; por otra, impide la formación de óxido de ^{60}Co . Las fuentes de ^{60}Co de teleterapia tienen una

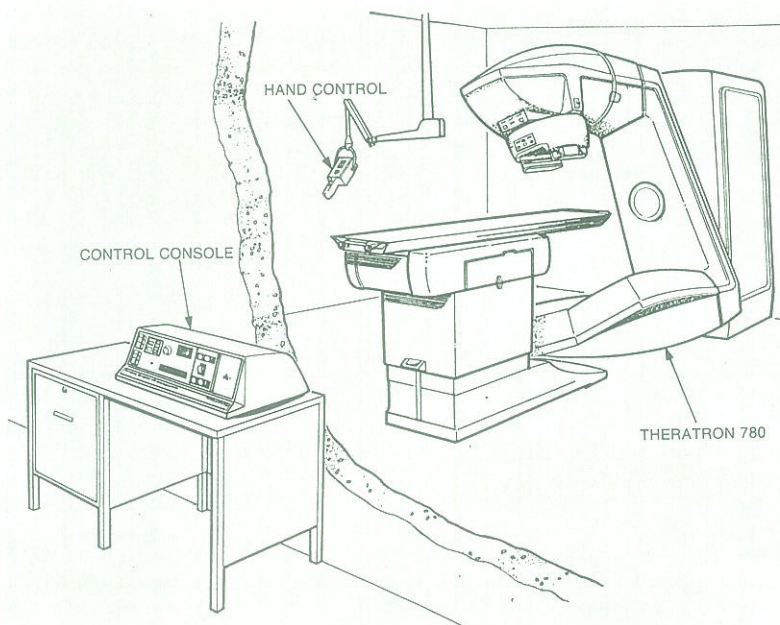
actividad muy alta, que puede llegar hasta $10.000 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{14} \text{ Bq}$.

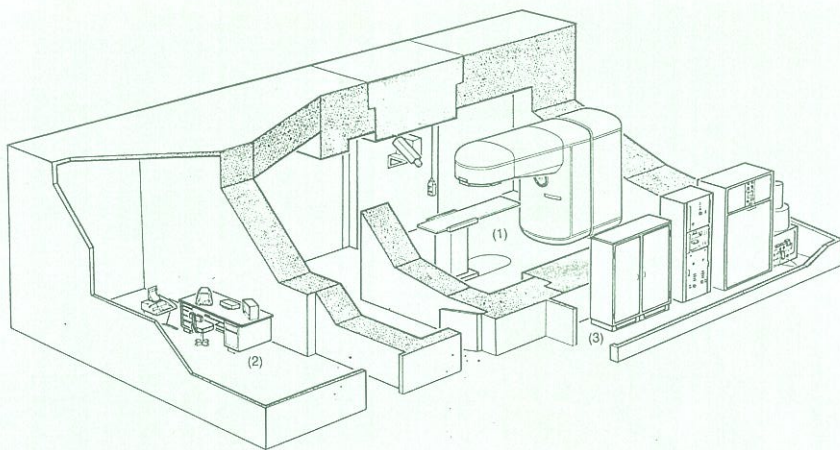
Las partes fundamentales de un equipo de telegammaterapia son:

- la fuente y su alojamiento
- el mecanismo de obturación
- los colimadores.

La fuente de ^{60}Co , que tiene una dimensión de $2 \times 2 \times 2 \text{ cm}$, va situada en el interior de un cabezal o contenedor de Pb y/o W que tiene por misión evitar que la radiación gamma emitida por la fuente de ^{60}Co se disperse en todas direcciones (Figs. VII y VIII). Este cabezal va sujeto a un pedestal que le per-

F VIII Vista general de una unidad de telecobaltoterapia. Theratron –780–, Cobalt Unit Operator's Manual Atomic Energy of Canada Limited





Manual de instrucciones del SATURNO. C G R Mév.

FIG Vista general de una instalación con un Acelerador Lineal (1) Sala de tratamiento. (2) Sala de control remoto. (3) Sala de máquinas.

mite determinados movimientos, como giro alrededor de un eje horizontal, giro del colimador alrededor de un eje vertical. La fuente permanece totalmente escondida en el cabezal, mientras no se emplea para tratamiento, y se encuentra en lo que se llama "posición de seguridad". Cuando se va a utilizar para tratamiento, la fuente pasa, por desplazamiento o giro, a la posición de tratamiento, posición en la que queda frente al colimador; en esta posición una de las caras de la cápsula queda descubierta y el haz de radiación sale a través del colimador. El mecanismo de "salida" y "entrada" de la fuente está controlado por un mecanismo electro-neumático. Todos los equipos de telecobaltoterapia están montados de tal forma que aseguran la vuelta de la fuente a su posición de seguridad ante cualquier incidente. Además, llevan mecanismos especiales de acción que permiten introducir la fuente de forma manual y rápida, en caso de que por fallo de todos los demás la fuente quedara fuera de su posición de seguridad. Todos los equipos de ^{60}Co van dotados, además, de varios dispositivos de alarma óptica y acústica que indican la posición de la fuente.

El colimador también es un componente importante de una unidad de ^{60}Co . Está formado por unas barras dentadas de W generalmente, que van engranadas unas en otras y que, mediante un movimiento continuo, permiten la formación de campos de radiación rectangulares de tamaño variable, desde $4 \times 4 \text{ cm}^2$ hasta $40 \times 40 \text{ cm}^2$. La distancia entre el borde del colimador y la piel del enfermo no debe ser inferior a 25 cm.

El colimador es semejante en todas las unidades de teleterapia, tanto equipos de telegammaterapia como acelerador. La mesa de tratamiento también es

otro elemento importante en un equipo de teleterapia: debe permitir todos los movimientos de desplazamiento en los tres ejes de coordenadas, además de giro. Todos los movimientos de la mesa deben estar perfectamente ajustados y realizarse de forma graduada, de manera que se puedan establecer en todo momento los parámetros de situación de la mesa.

ACELERADORES

ACELERADOR CIRCULAR BETATRON

El Betatrón es un dispositivo circular en el que se aceleran electrones que proceden de un filamento incandescente. Esta estructura circular, en la que previamente se ha practicado el vacío, está situada entre los polos de un electroimán que crea campos magnéticos alternantes. Los electrones giran en órbitas fijas, en las que van siendo acelerados hasta altas energías; cuando se ha alcanzado la energía necesaria los electrones son derivados de su órbita hacia una ventana de salida del haz, o bien se les hace chocar con un blanco de tungsteno y se produce un haz de Rx. Pueden conseguir haces de fotones de hasta 45 MV. Estos equipos, que se difundieron durante los años sesenta, ahora han sido desplazados por los aceleradores lineales.

ACELERADORES LINEALES

En estos equipos la aceleración de los electrones se hace en un recorrido rectilíneo a lo largo de un tubo de vacío que se llama "guía de onda", ya que en él se ha generado una onda electromagnética de muy alta frecuencia

(unos 3.000 MHz), que es la encargada de "empujar" a los electrones. Igual que en los betatrones, se pueden obtener haces de electrones o de Rx. Estos equipos pueden producir haces de distintas calidades, cuyos valores extremos son 4 MV y 25 MV para fotones y 4 MeV y 20 MeV para electrones.

SALAS DE TRATAMIENTO EN TELETERAPIA

Todos los equipos de teleterapia van instalados en recintos blindados (bunkers) cuyas paredes de hormigón pueden tener hasta 2 m de espesor, y las puertas de acceso a ellas son blindadas con plomo sólo, como en el caso de las unidades de ^{60}Co y Acelerador de hasta 6 MV, o con Pb y parafina en aceleradores de más de 6 MV (Fig. IX). El plomo tiene como misión proteger de la radiación de fotones. La parafina es para reducir la posible dosis de neutrones que se producen en los aceleradores de más de 10 MV.

Las instalaciones de teleterapia constan de:

- sala de tratamiento - Recinto donde va instalado el equipo y se colocan los enfermos para ser irradiados.
- sala de control remoto - Recinto exterior a la sala de tratamiento desde donde se maneja el equipo de tratamiento.
- sala de máquinas en el caso de los aceleradores.

Aunque no forma parte propiamente de la instalación de teleterapia, es importante la existencia de un taller para preparar accesorios dentro del mismo Servicio de Radioterapia.

DOSIMETRIA FISICA - DOSIMETRIA CLINICA

El control preciso de la dosis de radiación que se da al enfermo es fundamental en Radioterapia; éste es el objeto de la dosimetría.

La dosimetría comprende dos fases importantes que son: dosimetría física y dosimetría clínica.

La dosimetría física tiene por objeto conocer los parámetros físicos que intervienen en la irradiación. La dosimetría clínica tiene por objeto determinar con precisión la dosis total que recibe el enfermo. Los distintos protocolos de dosimetría establecen que la precisión requerida en dosimetría física es $\pm 3\%$ y la precisión necesaria en dosimetría clínica es de $\pm 5\%$.

CONCLUSION

La Radioterapia es una actividad multidisciplinaria de la que participan tanto la física como la biología y la tecnología.