

TEMA 4: DISEÑO DE LAS INSTALACIONES DE RADIOTERAPIA EXTERNA

ÍNDICE

- 1. INTRODUCCIÓN: ASPECTOS GENERALES DEL DISEÑO**
- 2. TIPOS DE RADIACIÓN PRESENTES EN UNA INSTALACIÓN DE RADIOTERAPIA EXTERNA**
- 3. ELEMENTOS DE UNA INSTALACIÓN**
- 4. CÁLCULO DE BLINDAJES**
- 5. SISTEMAS DE SEGURIDAD PARA PROTECCIÓN CONTRA LA RADIACIÓN**
- 6. SISTEMAS AUXILIARES**

1. INTRODUCCIÓN: ASPECTOS GENERALES DEL DISEÑO

El diseño estructural de una instalación de Radioterapia Externa es, junto con el diseño de la unidad productora de radiación (acelerador o unidad de Cobalto), el factor más importante para asegurar la protección radiológica del personal que la opera y del público que se encuentra cerca de ella. Es por eso que la legislación obliga, antes de autorizar la construcción de una nueva instalación, a presentar un proyecto detallado en el que se debe especificar las medidas geométricas y la composición de todos los elementos que la forman, y analizar cuantitativamente las dosis de radiación en las distintas zonas. La instalación sólo será autorizada si el proyecto demuestra que los niveles normales de dosis en cada sala son inferiores a los especificados por la legislación para el tipo de personal que se encontrará habitualmente en ella, y que el riesgo de exposiciones accidentales es mínimo.

Al estudiar los riesgos radiológicos hay que considerar, además del funcionamiento normal de la unidad, los accidentes o errores que pueden producirse. El diseño de la instalación debe asegurar una protección radiológica mínima incluso en el caso de que se produzcan dichos fallos. Los sistemas que resultan más críticos, como por ejemplo el control del tiempo de irradiación, deben estar duplicados para evitar que los pacientes reciban dosis peligrosas; y deben existir sistemas que mantengan la seguridad de la instalación, interrumpiendo la irradiación, en caso de accidentes previsibles tales como cortes de alimentación eléctrica, incendios, inundaciones etc.

Además de cumplir estos requisitos indispensables, el diseño de la instalación debe ser funcional, es decir, debe facilitar en la medida de lo posible el trabajo habitual; esto aumentará tanto la eficiencia como la seguridad, puesto que un diseño que obligue a hacer frecuentemente manipulaciones complejas es en general menos seguro que otro que permita realizarlas de forma más sencilla. Otros factores que condicionarán el diseño de una instalación concreta son el espacio disponible, la distribución de los accesos, las características de las salas adyacentes, el coste económico, etc.

En general, es conveniente situar las instalaciones de Radioterapia Externa lejos de zonas de paso hacia otras dependencias, para evitar la irradiación, por baja que sea, del público que acude o trabaja en éstas. Para ahorrar blindajes, que suelen suponer una parte importante del coste de construcción, es preferible colocarlas en lugares donde se minimice el número de salas adyacentes. Ambos requisitos han llevado a menudo a situarlas en el sótano, dado que por un lado no suele ser zona de paso y por otro se evita la necesidad de blindar el suelo. Además se elimina el problema constructivo de tener que soportar el peso de los equipos y las paredes de blindaje. Por último, si hay varias unidades de Radioterapia es ventajoso colocar los búnkeres adyacentes, porque el blindaje de la pared común sirve para ambos lados.

2. TIPOS DE RADIACIÓN PRESENTES EN UNA INSTALACIÓN DE RADIOTERAPIA EXTERNA (R.E.)

Para poder entender los requisitos de blindaje de una instalación, es necesario conocer cómo es la radiación que se produce en una unidad de R.E. (acelerador lineal o unidad de Cobalto). Se suelen distinguir, en función de su origen, los siguientes tipos:

- La radiación terapéutica, es decir, la radiación utilizada en el tratamiento de los pacientes, (llamada **radiación primaria o directa**) está colimada en un cono de anchura limitada, que puede estar orientado en cualquier dirección dentro de un círculo vertical y perpendicular a la mesa, alrededor del isocentro. La energía de

esta radiación es constante en el caso de las unidades de Cobalto; en los aceleradores lineales es posible que se puedan utilizar distintas energías y elegir además entre electrones y fotones. Es la radiación más intensa de todas las que comentaremos. En los últimos años han aparecido algunos equipos no isocéntricos, como el sistema Cyberknife, en los que la radiación se puede emitir en cualquier dirección; esos equipos requieren medidas de blindaje especiales.

- Hay también radiación no deseada que atraviesa los blindajes de la cabeza de la unidad, que puede emitirse en cualquier dirección. Esta **radiación de fuga** se emite continuamente en las unidades de Cobalto, y sólo durante la irradiación en los aceleradores; su magnitud depende del diseño de la unidad y es un dato que debe proporcionar el fabricante. Sólo se toma en cuenta la correspondiente a los fotones, y se suele considerar que su energía es igual a la de la radiación primaria.
- La **radiación dispersa**: está constituida por los fotones que se producen cuando el haz primario choca con el paciente, la mesa o las paredes del búnker, y por los generados en choques subsiguientes de estos fotones secundarios. Esta radiación tiene una intensidad mucho menor que la primaria, pero se emite en cualquier dirección y desde cualquier punto del búnker; por eso requiere medidas adicionales de protección, ya que puede alcanzar zonas a las que no llega el haz directo. Su energía es menor que la de la radiación primaria.

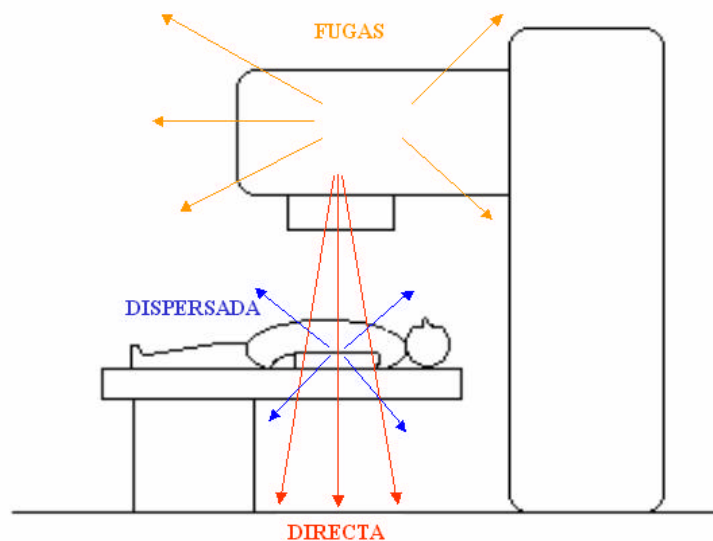


Figura 1: Tipos de radiación

En aceleradores de alta energía existen además dos procesos que generan nuevos riesgos radiológicos: la **producción de neutrones** al chocar los fotones con el material de la cabeza de la unidad (este proceso ocurre sólo para energías superiores a 8 MeV), y la **activación** de una pequeña parte de este material, que pasa a ser radiactiva, aunque en general con un tiempo de decaimiento muy corto. Los neutrones complican el diseño porque pueden sufrir choques elásticos en los que cambian de dirección sin perder energía; así pueden rebotar en las paredes y alcanzar zonas a las que los fotones llegan muy atenuados. Además, la composición de los blindajes utilizados para los fotones es poco eficaz contra los neutrones, que requieren otro tipo de materiales.

3. ELEMENTOS DE UNA INSTALACIÓN

En la figura 2 hemos ilustrado los elementos principales de los que consta una instalación típica. Discutiremos brevemente las características más importantes del diseño de cada una de ellas que afectan a la seguridad radiológica.

- La **unidad productora de radiación** (acelerador lineal o Cobalto) es, como se ha dicho, un elemento esencial en la protección radiológica, especialmente para el paciente y debe tener mecanismos de verificación que aseguren que éste no

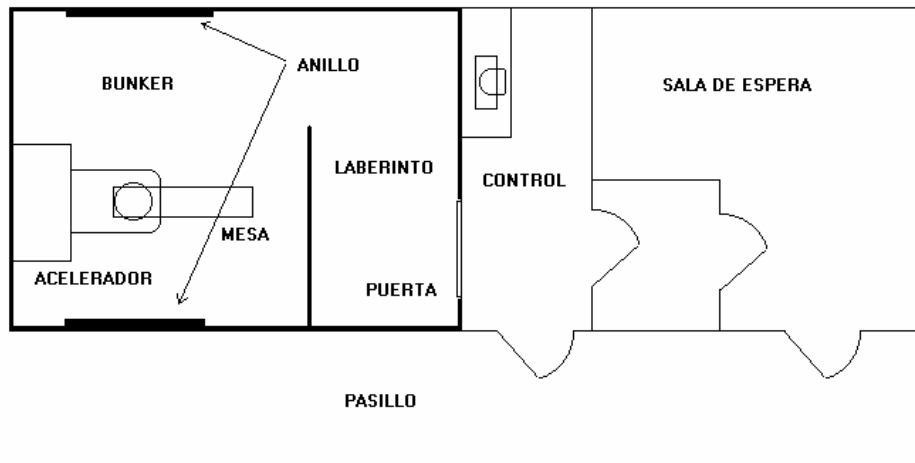


Figura 2: Esquema de una instalación típica de radioterapia externa

recibe más dosis de la programada. En particular, el tiempo total de irradiación (o las Unidades Monitor (UM) totales) deben ser controladas por un contador principal y otro secundario totalmente independientes; si el principal no interrumpe la irradiación cuando se alcance el valor previsto, lo hará el secundario. Los aceleradores de electrones, debido a su complejidad, deben disponer de **circuitos redundantes de control** que verifiquen continuamente que los parámetros de la irradiación (energía, tasa de dosis, homogeneidad) son constantes mientras dura ésta; si detectan alguna discrepancia deben interrumpirla. Las unidades de Cobalto deben tener un blindaje alrededor de la posición en la que se coloca la fuente cuando no hay irradiación, capaz de reducir la dosis que pueden recibir las personas que trabajan habitualmente en el búnker (operadores, principalmente) a niveles muy inferiores a los límites legales.

- El **búnker** rodea al acelerador y sus paredes, techo y (si es necesario) suelo constituyen el principal blindaje contra la radiación producida. El cálculo de los espesores necesarios en cada pared se discutirá en el capítulo siguiente; aquí sólo mencionaremos que las zonas a las que puede llegar el haz directo requieren habitualmente un espesor de blindaje adicional, denominado **anillo**. El tamaño del búnker debe ser suficiente para permitir las operaciones de montaje y desmontaje de la unidad y el paso de camillas hasta la mesa. Es conveniente que las paredes y los muebles que haya en su interior estén los más alejados posible del foco de radiación, porque así se reduce la radiación dispersada en ellos que alcanza al paciente.

Hay que prestar especial atención a las **juntas** entre paredes y a los agujeros o **penetraciones** en el búnker utilizados para que lleguen al interior cables o tuberías; si el diseño no es correcto, pueden aparecer zonas en las que el blindaje real es muy inferior al espesor de la pared. Esto se ilustra en la figura 3 donde se ven ejemplos de diseños correctos e incorrectos.

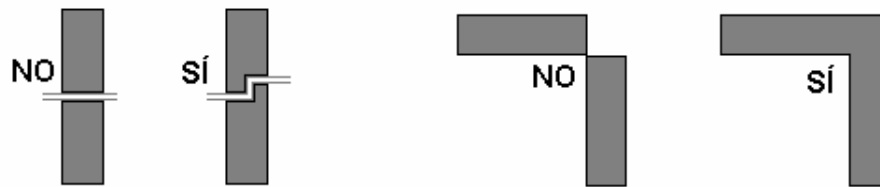


Figura 3: Ejemplos correctos e incorrectos de penetraciones y juntas

- El **laberinto** conecta al búnker con la puerta y actúa como un elemento de blindaje adicional que disminuye la radiación dispersa que llega a ésta. Además actuaría como una barrera de protección en el caso de que alguien quedara accidentalmente dentro del búnker durante una irradiación. Puede tener uno o varios tramos; si sólo tiene uno, debe estar diseñado de forma que desde la puerta no sea visible ninguna parte de las paredes que pueda ser irradiada por el haz directo. De esa forma nos aseguramos que los fotones que lleguen a la puerta hayan sufrido al menos dos interacciones, lo que implica una disminución de intensidad en un factor 1/10000. La anchura del laberinto debe permitir el paso de las camillas usadas para transportar a los pacientes.
- La **puerta** de acceso constituye normalmente el elemento de menor blindaje en el búnker, dado que su peso máximo está limitado por la necesidad de poder abrirla con facilidad; por eso requiere siempre un estudio especial. El laberinto simplifica el diseño puesto que, como se ha dicho antes, disminuye mucho la radiación que incide sobre ella. Aún así, a veces son necesarias puertas muy voluminosas, que necesitan un motor para abrirlas o cerrarlas. Esto ocurre sobre todo en los aceleradores con energías superiores a 8 MeV, debido al problema ya comentado de la producción de neutrones. En ese caso, la puerta debe tener un blindaje adecuado a los neutrones, consistente en varios pares de láminas alternadas de plomo y de un material con alto contenido en hidrógeno (por ejemplo parafina). El material hidrogenado frena a los neutrones, y el plomo absorbe la emisión gamma que se produce cuando los neutrones lentos son capturados por un núcleo atómico.

Para aceleradores de baja energía o unidades de cobalto son suficientes puertas con un revestimiento de plomo o acero; incluso pueden tener ventanas de vidrio plomado para facilitar el control del búnker. En algunos casos, si el laberinto es suficientemente largo, no es necesario ningún blindaje en la puerta, que puede incluso suprimirse.

- La **sala de control**, desde donde los operadores supervisan la irradiación, debe contener todos los monitores que regulan los parámetros de la unidad (energía, tiempo total, tamaño de campo etc.). Debe servir también para controlar el acceso al búnker, de forma que sea imposible que alguien entre en él sin ser visto por los operadores. Por último, debe contar también con pantallas de televisión de circuito cerrado para vigilar al paciente mientras es irradiado, y sistemas de intercomunicación para poder hablar con él.

4. CÁLCULO DE BLINDAJES

El espesor de blindaje necesario en cada una de las partes del búnker es función de varios factores: en primer lugar, del tipo, la intensidad (promediada en el tiempo) y la energía de la radiación que incide sobre ella; en segundo lugar, del uso de las salas que hay detrás (en zonas de paso el blindaje será menor que en zonas de trabajo); y en tercer lugar, del tipo de personal presente en esas salas: ya se ha explicado que a los trabajadores profesionalmente expuestos se les aplican límites de dosis muy superiores a los aplicables al público en general.

El cálculo más sencillo es el que se aplica a la radiación primaria, que tiene intensidad, energía y foco bien definidos. El cálculo de blindajes para la radiación dispersa es más complicado porque cualquier parte del búnker puede ser fuente de radiación dispersa, pero con energía e intensidad muy variables. Eso lleva a realizar distintas aproximaciones, como la de tomar en cuenta solamente la primera dispersión en el paciente o en las paredes. Esta aproximación es razonable porque se ha comprobado que en cada dispersión el haz de fotones se atenúa aproximadamente en un factor 1/100, así que la primera dispersión tiene una intensidad que es el 1% de la radiación primaria, la segunda un 0.01% y así sucesivamente. Por último, el cálculo de blindajes para neutrones es muy complejo, y requiere la aplicación de modelos semiempíricos o la realización de simulaciones mediante el método de Monte Carlo. En este curso sólo discutiremos el cálculo para la radiación primaria.

El método de cálculo es el que se recomienda en la norma alemana DIN-6847, que es el estándar de facto que se emplea en España dado que no existe una norma nacional al respecto. El espesor de blindaje necesario h en una pared se calcula mediante la fórmula:

$$h = H_{dr} \cdot \log_{10} [(Q \cdot D_{cal(a\ 1\ m)} \cdot F_u \cdot F_o \cdot F_{eb}) / (d^2 \cdot D_{lim})]$$

A continuación describimos el significado de cada uno de los términos:

- H_{dr} es el espesor décimorreductor del material del que está hecha la pared, correspondiente a la energía para la que se calcula el blindaje. En el caso de aceleradores multienérgicos se toma la mayor energía de fotones, puesto que si el blindaje es suficiente para ésta será válido también para las más bajas y para los electrones.
- Q es la carga de trabajo anual del acelerador, es decir, el tiempo total durante el que el acelerador está irradiando durante un año. Se suele expresar en Unidades Monitor (aceleradores) o en minutos (Cobalto).
- $D_{cal(a\ 1\ m)}$ es la Dosis de calibración a 1 metro; es decir, la dosis correspondiente a 1 U.M. ó a 1 minuto, a una distancia de 1 metro del foco del haz. Por lo tanto, el producto $Q \cdot D_{cal(a\ 1\ m)}$ representa la dosis total suministrada por el acelerador a una distancia de 1 metro del foco durante un año.
- F_u es el factor de uso, es decir, la fracción del tiempo total de irradiación en la que el acelerador está apuntando hacia la pared cuyo blindaje estamos calculando. Se suele tomar un factor entre 1 y 0.25, dependiendo del tipo de técnicas que se empleen. Si la mayoría de las irradiaciones se realizan exclusivamente en las direcciones antero-posterior y postero-anterior, se tomará un valor cercano a 1 para el techo y el suelo y entre 0.25 y 0.1 para las paredes laterales; si las irradiaciones laterales son frecuentes, se tomarán valores más altos para las paredes.
- d es la distancia desde el foco de la radiación (no desde el isocentro, sino desde la cabeza de la unidad) hasta la pared estudiada, expresada en metros.
- D_{lim} es el límite anual de dosis aplicable al personal que se encuentre normalmente detrás de la pared. Si se trata de personal expuesto (por ejemplo, en la sala de control) se considerará el valor promedio de 20 mSv/a. En caso de miembros del público, el

límite anual de dosis es 1 mSv/año (consultas, secretarías, salas de espera, pasillos etc).

- F_o es el factor de ocupación de la sala que está protegida por la pared, es decir, la fracción del tiempo que la sala está ocupada durante el horario de trabajo de la unidad. Normalmente se toma el valor 1 para zonas de trabajo, como la sala de control, consultas, despachos, habitaciones de pacientes etc.; 1/4 para zonas de ocupación temporal, como salas de espera o pasillos; y 1/12 en habitaciones de ocupación ocasional (ascensores, aseos etc.).
- F_{eb} es el factor de equivalencia biológica de la radiación que estamos considerando. Ese factor es 1 para fotones y electrones; para protones y neutrones su valor depende de la energía y es siempre superior a 1.

La interpretación de la ecuación anterior está clara si la reordenamos y la expresamos en la forma siguiente:

$$[Q \cdot D_{cal(a\ 1\ m)} \cdot F_u \cdot F_{eb} / d^2] \cdot 10^{-h/H_{dr}} \cdot F_o = D_{lim}$$

- El término entre corchetes representa la dosis equivalente total que llega a la pared durante un año; el segundo representa el factor de atenuación del blindaje de espesor h , y el tercero es el factor de ocupación de la sala contigua a la pared. El producto de esos tres términos debe ser igual (o inferior) al límite de dosis anual aplicable al personal que haya habitualmente en esa sala. Así se cumple la condición que explicamos en la introducción de este capítulo.

5. SISTEMAS DE SEGURIDAD PARA PROTECCIÓN CONTRA LA RADIACIÓN

Además de los blindajes, toda instalación de Radioterapia Externa debe contar con una serie de sistemas y mecanismos de seguridad para proteger contra la radiación a los pacientes, al personal de operación y al resto del público. Estos son los más importantes:

- Debe existir un monitor de radiación dentro del búnker que mida de forma continua la dosis en su interior, y emita una señal luminosa y/o acústica cuando se sobrepase un determinado nivel. Estas señales deben ser visibles desde el puesto de control y desde la puerta del búnker.
- Deben existir botones de parada (denominados “setas”) en lugares fácilmente accesibles en el búnker y en la sala de control, que deben interrumpir la irradiación, el suministro eléctrico del equipo y los movimientos del acelerador y la mesa. De esta forma, los operadores pueden reaccionar ante emergencias que supongan un riesgo de irradiación accidental, de electrocución o de aplastamiento. Estos botones deben ser muy visibles (suelen estar pintados de rojo) y todo el personal que trabaja habitualmente en la unidad debe conocer su ubicación. Como factor adicional de seguridad, si se aprieta un botón se queda bloqueado, y hay que sacarlo antes de poder poner de nuevo en marcha la unidad, tras comprobar que no hay ningún peligro.
- La puerta debe disponer de un sistema de enclavamiento que impida que se produzca la irradiación cuando no está cerrada; si la puerta se abre en el transcurso de la irradiación, el sistema debe interrumpirla automáticamente. Si no hay puerta debe existir un sistema de detección del paso de personas (por ejemplo, mediante células fotoeléctricas) que realice la misma función.

- La consola de control de la unidad debe tener mecanismos de seguridad que impidan su uso por personas no autorizadas: llaves, claves de acceso etc.
- Las unidades de Cobalto deben estar diseñadas de forma que, en el caso de que se interrumpa el suministro eléctrico (durante un apagón, por ejemplo), la pastilla radiactiva vuelva automáticamente a su posición de almacenamiento blindada. Normalmente esto se consigue acoplado la pastilla a un muelle que se tensa cuando la pastilla se coloca en la posición de irradiación; si la fuerza desaparece el muelle devuelve la pastilla a la posición de seguridad. Además, debe existir un sistema manual para empujar la fuente, por si fallara el sistema automático.

6. SISTEMAS AUXILIARES

Hay varios sistemas auxiliares que aumentan la seguridad de la instalación, aunque no estén destinados específicamente a proteger contra la radiación. Describiremos brevemente los más importantes.

- El sistema de ventilación debe asegurar una renovación adecuada del aire y el mantenimiento de una temperatura que resulte cómoda para los pacientes. Además hay que tener en cuenta que la irradiación con electrones produce, por la ionización del aire, pequeñas cantidades de ozono; este gas no es radiactivo pero es tóxico en altas concentraciones. Por eso, si se emplean frecuentemente irradiaciones con electrones con campos grandes y tiempos largos (como suele ser habitual en los tratamientos de terapia superficial), hay que aumentar la potencia del sistema de ventilación para eliminarlo.
- El sistema de refrigeración de la unidad debe evitar calentamientos excesivos que podrían dañar los componentes electrónicos o incluso producir incendios. Normalmente los aceleradores tienen incorporados sistemas de control que impiden el funcionamiento si la temperatura es demasiado alta.
- Debe existir un sistema de extinción contra incendios. Los extintores disponibles deben ser del tipo adecuado en presencia de voltajes eléctricos altos, dado que en muchos aceleradores hay componentes que funcionan con voltajes superiores a 10.000 V.
- La mesa debe tener la rigidez suficiente como para soportar el peso de los pacientes más pesados, y sus mecanismos de bloqueo deben ser fiables en condiciones de uso habitual. Igualmente, las sujeciones mecánicas de los accesorios de la unidad (aplicadores, bandejas, bloques) que podrían, si se soltaran, caer sobre el paciente, deben ser seguras.
- Debe existir un sistema de circuito cerrado de televisión para que los operadores puedan vigilar al paciente mientras éste está solo dentro del búnker. Debe existir también un sistema de comunicación que permita hablar con él, de forma que se le puedan dar instrucciones en caso de emergencia.