

RADIACIONES IONIZANTES: RAYOS X

1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

La radiación que luego se denominó X, se obtuvo mediante el paso de una corriente eléctrica de alta tensión (alto voltaje) a través de gases confinados en un tubo cerrado hermético a muy baja presión.

Sin embargo, la primera observación de los rayos X, se debe a Roentgen en 1895, cuando estudiaba rayos catódicos (corriente de electrones) en un tubo de descarga con gas y aunque lo colocó dentro de una caja de cartón negro, Roentgen vio que una pantalla de platinocianuro de bario, que casualmente estaba cerca, emitía luz fluorescente siempre que funcionaba el tubo. Tras realizar experimentos adicionales, determinó que la fluorescencia se debía a una radiación invisible más penetrante que la radiación ultravioleta.

de esta experiencia concluyó que esta radiación podía:

- ✚ Penetrar sustancias opacas
- ✚ Producir fluorescencia
- ✚ Oscurecer placas fotográficas
- ✚ Ionizar un gas.

Roentgen llamó a los rayos invisibles "rayos X" por su naturaleza desconocida. Posteriormente, los rayos X fueron también denominados rayos Roentgen en su honor.

2. CARACTERÍSTICAS DE LOS RAYOS X

Los rayos X son **radiaciones electromagnéticas de origen orbital**, que presentan alta energía, alta frecuencia y longitud de onda corta (10^{-8} a 10^{-13} m). Cuanto menor es la longitud de onda de los rayos X, mayores son su energía y poder de penetración. Se ubican en el espectro electromagnético, entre las radiaciones ultravioletas y las gamma, presentando inclusive un "traslape" entre estas ondas adyacentes. (Ver figura 2.1)

Los rayos de mayor longitud de onda, cercanos a la banda ultravioleta del espectro electromagnético, se conocen como **rayos X blandos**; los de menor longitud de onda, que están más próximos a la zona de rayos gamma o incluso se solapan con ésta, se denominan **rayos X duros**. Tanto la luz visible como los rayos X se producen a raíz de las transiciones de los electrones atómicos de una órbita a otra. La luz visible corresponde a transiciones de electrones externos y los rayos X a transiciones de electrones internos. Los rayos gamma, cuyos efectos son similares a los de los rayos X, se producen por transiciones de energía en el interior de núcleos excitados.

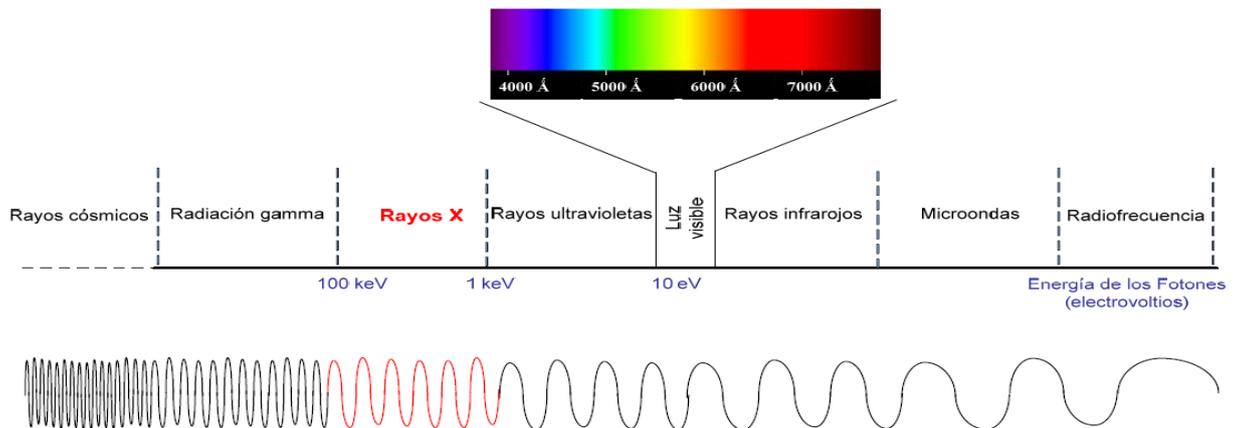


Figura 2.1

Se pueden resumir las siguientes características a partir de **su ubicación** en el espectro E.M.:

- ◆ Estas radiaciones **se propagan en el vacío** a la velocidad de la luz, en línea recta y en cualquier dirección del espacio.
- ◆ Pertenecen al **espectro invisible**, aunque se percibieron originariamente como una “fluorescencia”
- ◆ No presentan **ni masa ni peso ni carga**, por lo que **no** son desviados por campos magnéticos.
- ◆ Producen **efecto fotoquímico** en la materia, promoviendo reacciones de reducción de átomos, por ej. del Br, de la Ag de las placas radiográficas.
- ◆ Su **penetrabilidad** en la materia depende del Z del elemento bombardeado para producir fotones X; tendrán mayor E° y menor λ los rayos generados, si el Z del elemento crece, siendo mayor su grado de penetrabilidad.
- ◆ Cuanto mayor es la densidad del material que atraviesan, hay mayor probabilidad de que los rayos X choquen contra la materia y transfieran a ella su energía.
- ◆ Poseen alto **poder ionizante**. Generan ionizaciones en las moléculas y átomos con los que interactúen, siendo éste el efecto biológico de mayor relevancia.

3. FUENTES DE RAYOS X

Además de las fuentes radiactivas, en la industria o en la medicina suelen usarse **aparatos de rayos X**. A diferencia de las fuentes radiactivas, pueden encenderse o apagarse cuando se necesite. Esta característica, a primera vista trivial, hace que el manejo de cada tipo de fuente sea muy distinto, y que las precauciones para protegerse de la radiación también lo sean.

Para generar rayos X se debe disponer de un haz de electrones producidos por una fuente de electrones (CATODO) y animados de suficiente velocidad, mediante la acción de un campo eléctrico creado por una diferencia de potencial.

Cuando un haz de electrones impacta contra un objeto (ANODO, ANTICATODO O BLANCO) se produce radiación electromagnética, conocida como rayos X, debido a dos tipos de procesos, los cuales dan lugar a **radiación de frenamiento y radiación característica.**

4. APARATO DE RAYOS X : Tubo de Rayos X o Tubo Radiógeno (Modelo de Coolidge)

La producción de rayos X requiere un tubo de vidrio Pyrex® resistente a las altas temperaturas, con cerrado hermético donde se ha logrado un vacío adecuado (billonésima de atm) dentro del cual hay un cátodo (electrodo negativo) y en el otro extremo un ánodo (electrodo positivo) ambos herméticamente sellados. (Ver Figura 4.1)

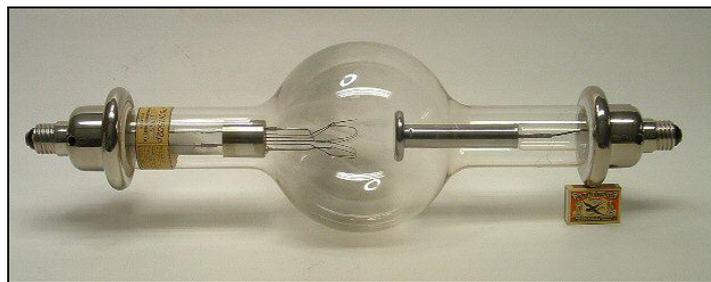


Figura 4.1

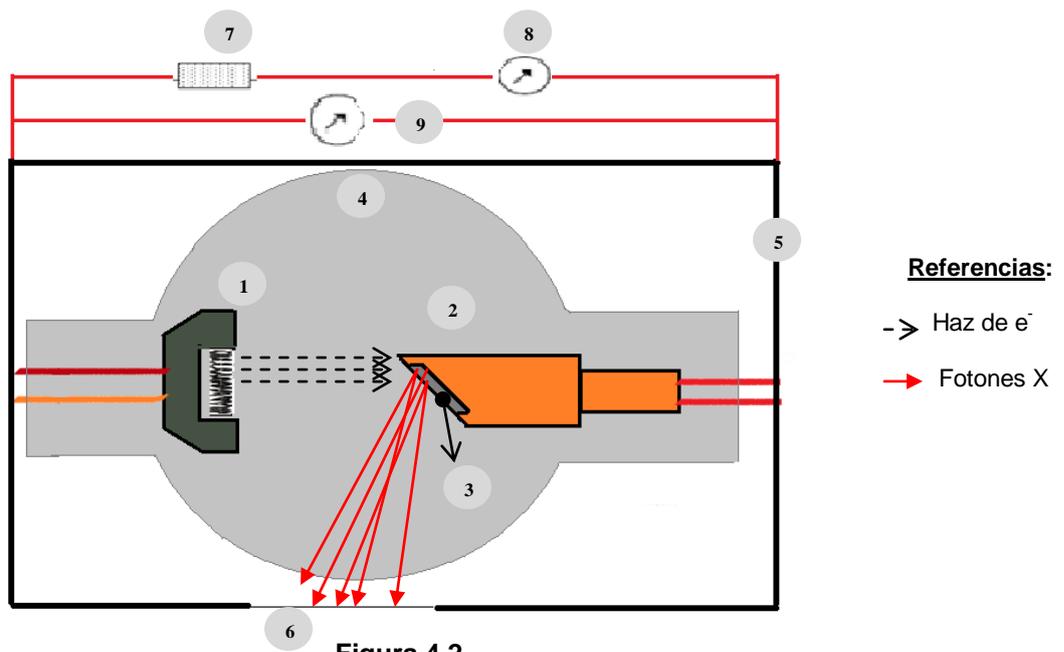


Figura 4.2

El tubo de rayos X está formado por: el cátodo (1) que libera electrones que impactarán sobre el ánodo (2), específicamente en un lugar del mismo, denominado blanco (3), la ampolla de cristal (4) mantendrá un vacío adecuado. El estuche de plomo (5) que lo rodea presenta una ventana de berilio (6) por donde son emitidos los rayos X. Éste tubo va conectado a: una fuente de alta tensión (7), un amperímetro (8) y un voltímetro (9). (Ver figura 4.2)

4.1 DESCRIPCIÓN DE ELEMENTOS DEL TUBO DE RAYOS X

4.1.1 CATODO:

Formado por dos partes principales: el filamento y la copa de enfoque. (Ver Figura 4.3)

- **Filamento**

Es una espiral de alambre que emite electrones al ser calentado. Cuando la corriente que atraviesa el filamento es lo suficientemente intensa, de aproximadamente 4 a 5 Ampere o superior, los electrones de la copa externa del filamento entran en ebullición y son expulsados del filamento, este fenómeno se conoce como emisión termoiónica (Efecto Edison). Los filamentos suelen estar formados por Tungsteno Tórico, el Tungsteno proporciona una emisión termoiónica mayor que otros metales. Su punto de fusión es de 3410°C, de forma que no es probable que se funda con el calor, además no se evapora, puesto que si lo hiciera el tubo se llenaría rápidamente de gas. La adición de un uno a un dos por ciento de Torio al filamento de Tungsteno, incrementa la eficacia de la emisión de electrones y prolonga la vida del tubo.

- **Copa de enfoque**

Formada por Molibdeno, cuyo objetivo es enfocar a los electrones acelerados hacia el ánodo

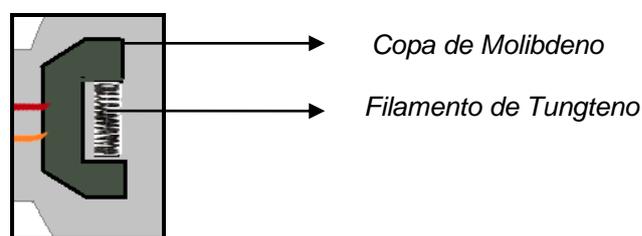


Figura 4.3

4.1.2 ANODO

Formado por un vástago de cobre, una cabeza de cobre y rodela de tungsteno (blanco) (Ver Figura 4.4)

El ánodo tiene tres funciones en el tubo de rayos X:

1. Es un conductor eléctrico
2. Proporciona soporte mecánico al blanco.
3. Debe ser un buen conductor térmico, cuando los electrones chocan con el ánodo, más del 99% de su energía cinética se convierte en calor, que debe ser eliminado rápidamente antes de que pueda fundir el ánodo. El cobre es el material más utilizado en el ánodo.

Existen dos tipos: estacionarios y rotatorios

El **Blanco** es el área del ánodo con la que chocan los electrones procedentes del cátodo. En los tubos de ánodo estacionario, el blanco consiste en una pequeña placa de tungsteno cortado a bisel, que se encuentra encastrado en un bloque de cobre. En los tubos de ánodo rotatorio, el disco que gira es el blanco, normalmente está formado por una aleación de Tungsteno mezclada con Torio, que proporciona una resistencia adicional para soportar el esfuerzo de la rotación rápida. El Tungsteno es el material elegido para el blanco. Como se observa en la Figura 4.5, el ánodo rotatorio o giratorio ofrece alternativamente, distintos espacios de choque a los electrones acelerados desde el cátodo. Así, el calor disipado por el choque de los electrones, se distribuye en una amplia superficie, soportando unas 10 a 20 veces más carga electrónica sin fundir el tungsteno del anticátodo. Los tubos con ánodo fijo, en cambio, desarrollan calor en un punto fijo estático de escasa superficie.

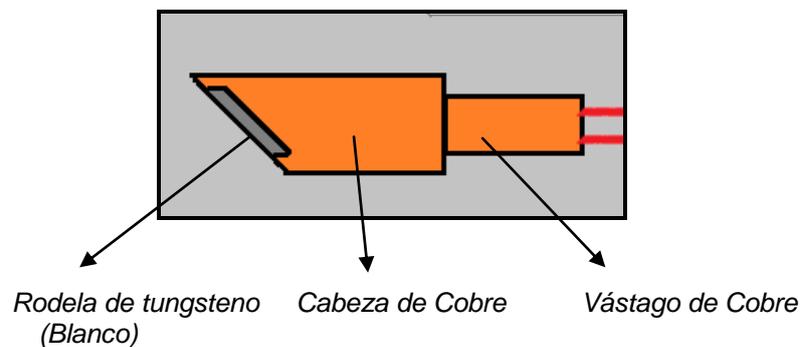


Figura 4.4

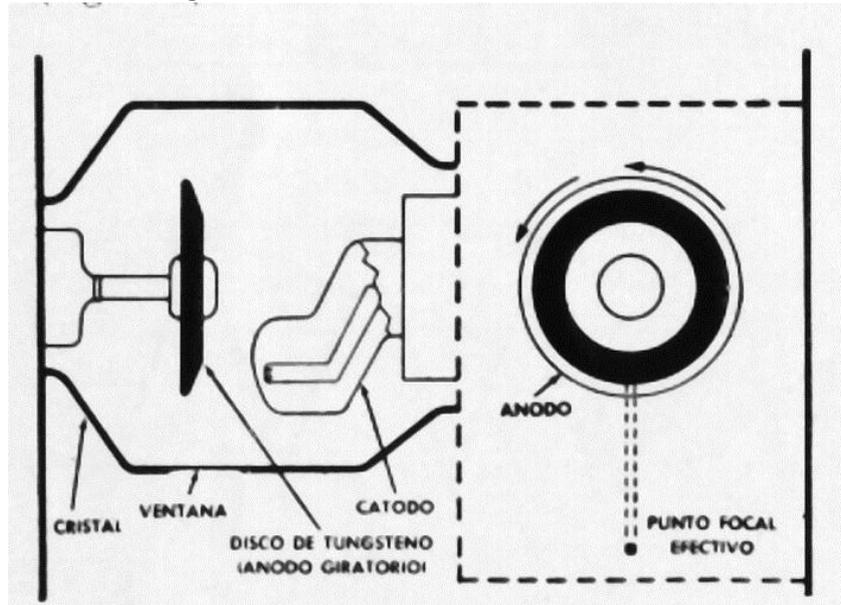


Figura 4.5

4.1.3 AMPOLLA DE CRISTAL

Es un tipo especial de tubo de vacío, donde se encuentran los electrodos, el cátodo y ánodo. Esta envoltura, que debe de ser fabricada de un vidrio que pueda soportar el tremendo calor generado, mantiene el vacío, lo cual hace posible una producción más eficaz de rayos X, y prolonga la vida del tubo. Si estuviera lleno de gas, disminuiría el flujo de electrones que van del cátodo al ánodo, se producirían menos rayos X y se crearía más calor.

4.1.4 CARCASA DE PLOMO

Carcasa protectora formada de plomo, y diseñada para controlar los serios peligros que afectaron a la radiología en sus principios, (exposición excesiva a la radiación, descarga eléctrica). La carcasa protectora proporciona también un soporte mecánico al tubo de rayos X, y lo protege frente al posible daño producido por la manipulación descuidada. Cuando se producen, los rayos X son emitidos con la misma intensidad en todas las direcciones, pero solo se emplean los emitidos a través de una sección especial del tubo de rayos X, llamada **ventana de berilio**. Los rayos X emitidos a través de la ventana se conocen como haz útil, los restantes que se escapan a través de la carcasa protectora son, la radiación de fuga. Esta ventana de berilio, está protegida por un diafragma y por un filtro. Estos dispositivos permiten controlar la colimación de los rayos X.

La carcasa protectora, alrededor de algunos tubos de rayos X, contiene aceite que actúa como aislante térmico y refrigerador.

4.1.5 FILTRO

Disco de aluminio que modifica la intensidad de la radiación al eliminar los fotones de rayos X de baja energía (larga longitud de onda). Emergiendo del mismo, rayos de mayor calidad.

4.1.6 COLIMADOR

Disco de plomo con una abertura central que regula el tamaño o la forma del haz de rayos X eliminando la radiación periférica y secundaria, con lo cual se cubre menos área en la piel del paciente, por consiguiente menos exposición.

4.1.7 FUENTE DE ALTA TENSIÓN, AMPERÍMETRO Y VOLTÍMETRO

La fuente de alta tensión produce la corriente eléctrica que pasa por la fuente de electrones, constituida por un filamento incandescente. De la variación de corriente depende la cantidad de rayos X producidos. La corriente eléctrica se mide en miliamperímetros (mA). Los electrones se aceleran en función de la tensión aplicada en el interior del tubo entre el filamento (cátodo) y la pieza metálica (ánodo). Esta tensión se mide en kilovoltios (kV) y de su variación depende la calidad de los rayos X (bajo voltaje: 50-90 kV, alto voltaje 100 - 150 kV). Estos fotones pueden tener cualquier energía por debajo de la energía cinética del electrón que los ha provocado.

4.2 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE RAYOS X

Los aparatos radiográficos constan básicamente de un cabezal y de un sistema de soporte mecánico para su manipulación. (*Ver Figura 4.6*)

El cabezal de rayos X consta del tubo radiógeno descrito, unido al transformador de corriente eléctrica. Ambos están protegidos dentro de una unidad "blindada", algunas de ellas llenas de aceite el cual funciona como aislante y refrigerante.

Hay una serie de elementos complementarios que controlan el funcionamiento del aparato, como un interruptor general de corriente, lámpara piloto, voltímetro, cronómetro, miliamperímetro, resistencia variable (reóstato), control de kilovoltaje, estabilizadores, toma a tierra.

El soporte del tubo radiógeno está acompañado por un sistema mecánico con versatilidad de movimientos, como el mostrado en la *Figura 4.7*.

En este modelo, donde el cabezal está unido a un brazo articulado, pero a la vez, fijo a la pared o a un equipo odontológico, da libertad de rotación al cabezal en los sentidos señalados.

Finalmente, los aparatos radiográficos dentales constan de los movimientos mencionados (desplazamiento y orientación espacial) que los hace fáciles de manipular en las técnicas radiográficas intraorales. Se verá luego, la importancia de esta característica de los aparatos de rayos X en la radioprotección.

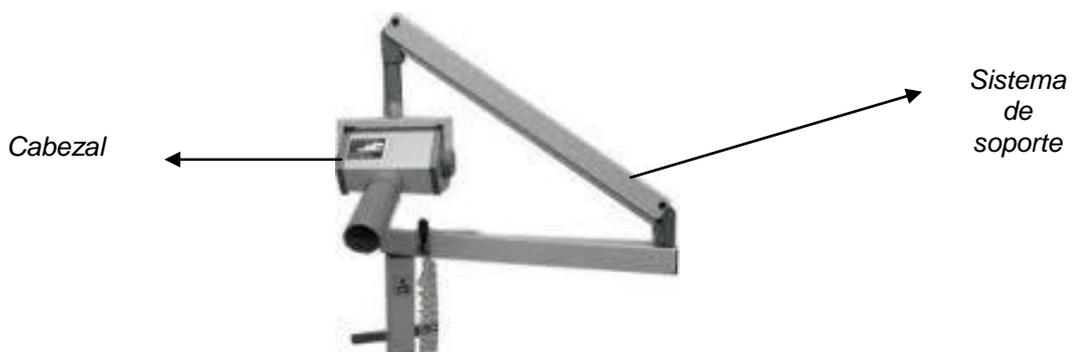


Figura 4.6

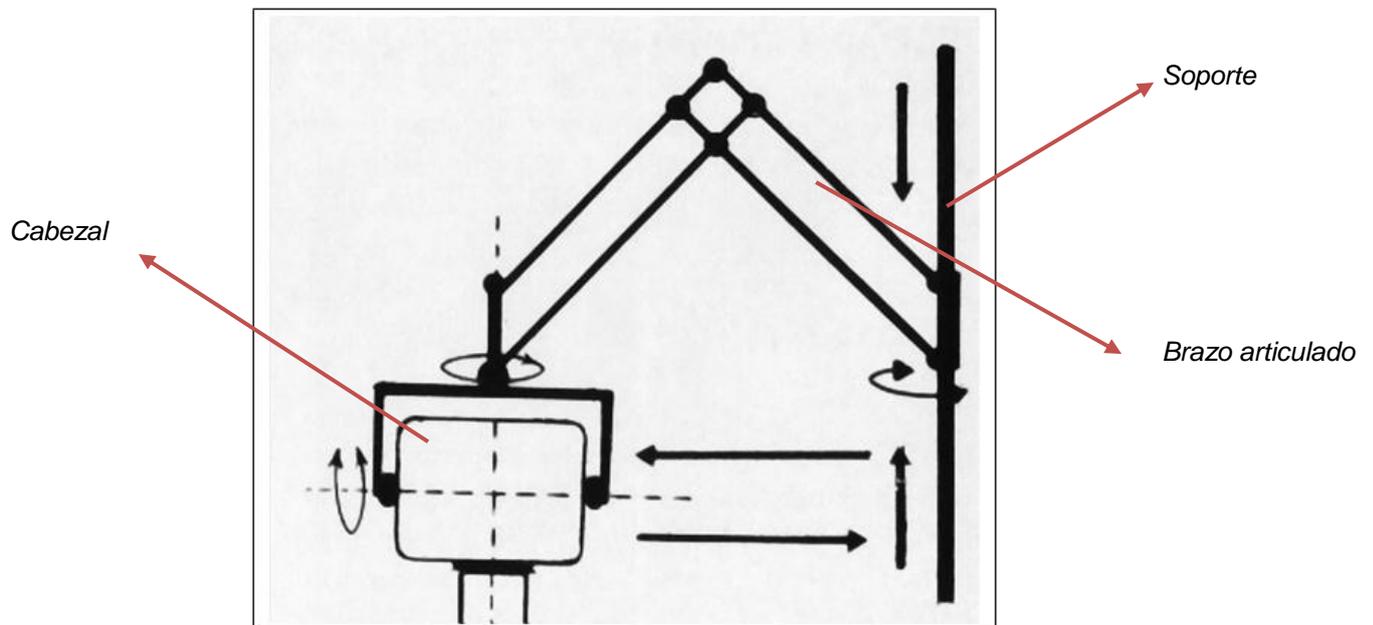


Figura 4.7

5. GENERACIÓN DE RAYOS X

Los rayos X se producen siempre que se bombardea un objeto material con electrones de alta velocidad. Gran parte de la energía de los electrones se pierde en forma de calor; el resto produce rayos X al provocar cambios en los átomos del blanco, como resultado del impacto.

Para que un electrón se libere desde un metal que posee electrones libres, se lo somete a alta temperatura hasta el estado de **incandescencia**, de manera que la intensidad de la emisión dependerá de la temperatura que alcance el metal. Este fenómeno fue estudiado por Edison y se llama **efecto Edison**. Es por ello, que en el cátodo, debido al paso de una corriente de varios mA y a un voltaje determinado (del orden de los 50 a 150 kV) y libera los electrones a alta velocidad (para 50 kV, alcanzan velocidad de 120.000 km / s). Este filamento de tungsteno se vuelve incandescente, pudiendo alcanzar una temperatura hasta de 2000°C.

El recorrido de los electrones entre el cátodo y el ánodo se realiza en la zona del tubo donde se ha hecho el vacío. Los electrones acelerados chocan a gran velocidad contra el blanco y su energía cinética se transforma una gran parte en calor y otra en fotones X mediante dos fenómenos diferentes: **colisión** (interacción entre un electrón del haz incidente y un electrón de un átomo del ánodo) y **frenada** (radiación producida por la desaceleración de un electrón incidente en las proximidades del núcleo de un átomo).

Los rayos X emitidos no pueden tener una energía mayor que la energía cinética de los electrones que los producen. La radiación emitida no es monocromática, sino que se compone de una amplia gama de longitudes de onda, con un marcado límite inferior que corresponde a la energía máxima de los electrones empleados para el bombardeo.

Los rayos X salen colimados por una ventana. A excepción de la ventana, el resto del tubo está protegido por una carcasa de plomo.

5.1 RADIACIÓN DE FRENAMIENTO

Son los rayos X producidos cuando el electrón proveniente del cátodo que viene a alta velocidad, se dirige al **núcleo del ánodo** y debido a la carga positiva de este (de signo contrario) puede sufrir una atracción electrostática **disminuyendo su velocidad**, es decir su energía cinética. La energía cinética perdida por el electrón se puede emitir en forma de fotón de rayos X. Los cuales también se denominan "**Rayos X de frenado**" o "**Rayos X generales**".

Cómo el electrón puede perder más o menos energía, puede encontrarse entre una fuerte atracción que resulte en frenado completo, con lo que el 100% de la energía cinética daría lugar a radiación X, o bien, en algunos casos, el electrón puede seguir su camino sin sufrir ningún tipo de modificación en su trayectoria,

lo cual no provocaría emisión alguna de radiación X (Ver Figura 5.1). Por consiguiente el fotón emitido puede poseer una energía muy variable, entre el cero y la energía cinética máxima que transportaba el electrón al producirse la colisión. Este tipo de fenómeno se caracteriza por poseer un **espectro continuo** de energías de radiación X.(Ver Figura 5.2)

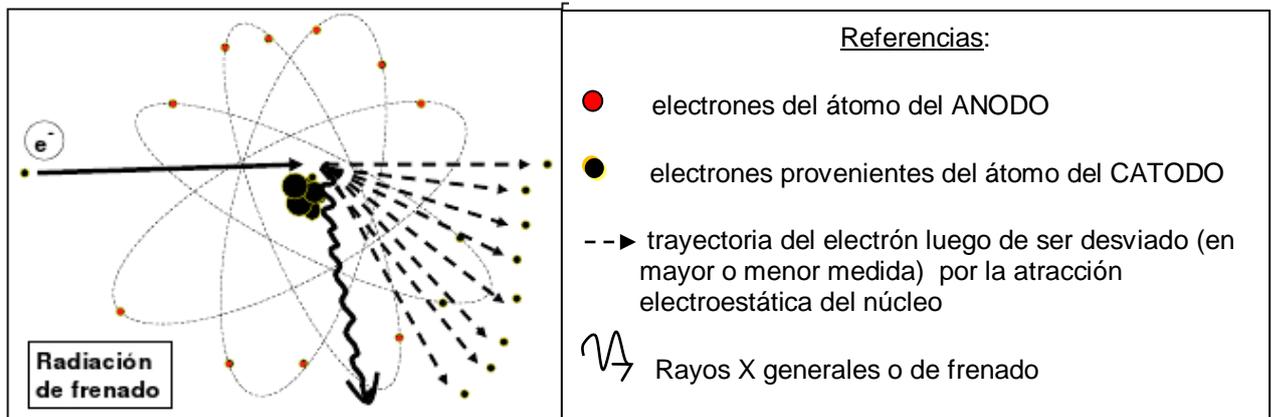
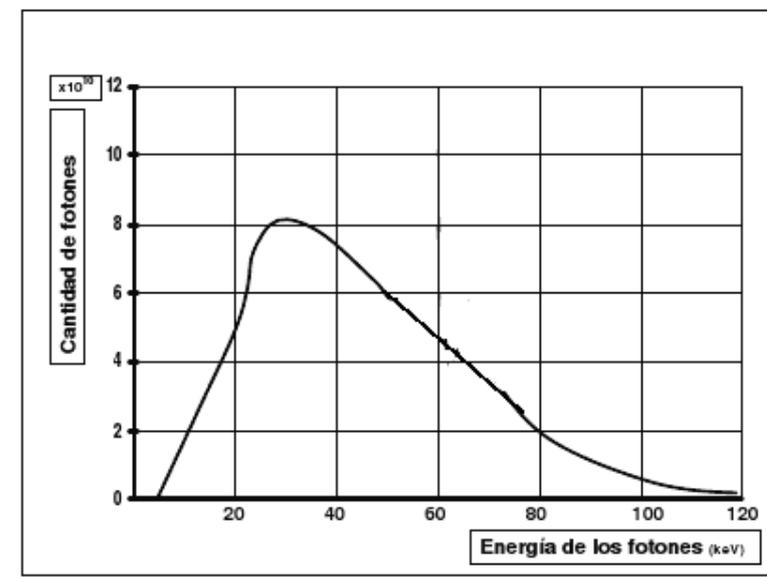


Figura 5.1

ESPECTRO DE RAYOS X GENERALES



El kilo voltaje seleccionado en el aparato de rayos X, da la energía máxima con que se aceleran los electrones. Una diferencia de potencial de 100 kV nos da una energía de los electrones de 100 keV con lo cual obtendremos fotones de frenado con energías comprendidas entre 0 y 100 keV. La radiación de frenado supone entre un 70 – 85% de la totalidad de radiación ionizante producida. (Ver Figura 5.2)

A tener en cuenta:

La energía de los rayos X está medida en miles de electrón-voltios (KeV) o millones de electrones voltios (MeV).

Un electrón-voltio, es una cantidad de energía igual a la energía ganada por un electrón, cuando éste es acelerado por un voltio.

Por ejemplo, si un electrón fuera acelerado por un potencial de 100 mil voltios (100 KV), el electrón tendría una energía de 100 mil electrón-voltios (100 KeV). Si toda esta energía fuera convertida a radiación electromagnética, el resultado sería un rayo X de 100 KeV. Las energías de los rayos X típicamente usados en radiografía, van desde unos pocos KeV a varios MeV o más, dependiendo del tipo de equipo de rayos X que se esté usando o el radioisótopo particular que esté siendo empleado

5.2 RADIACIÓN CARACTERÍSTICA

Son los rayos X producidos cuando un electrón libre proveniente del cátodo que tiene energía exactamente igual al salto de orbital (en general para los niveles K, L, M) choca a gran velocidad con algún **electrón del átomo del anodo**, éste gana su energía y “salta” a un nivel de energía más externo. El electrón excitado, después de unos 10^{-8} s, vuelve a su nivel de origen y **libera la diferencia de energía que absorbió** en forma de **radiación electromagnética** de λ muy corta, como **fotón o rayo X**. Si los choques ocurrieran contra electrones de niveles superficiales, se producen otras radiaciones E.M. de mayor λ , tales como radiación U.V., radiación infrarroja, aún luz visible.

Como en esta interacción o choque, la energía cinética del electrón acelerado es tan elevada que puede excitar o ionizar los electrones corticales de los átomos del anodo, en caso de ionizarlo, el hueco que queda en la órbita interna, tiende a ser ocupado espontáneamente por otro electrón de una órbita próxima emitiéndose la diferencia de energía existente como radiación electromagnética X. (Figura 5.3)

Esta emisión de radiación tiene un **valor determinado** de energía para cada valor de Z de cada uno de los distintos átomos, y para que se de este tipo de radiación característica, la energía del electrón incidente deberá ser superior a la energía de enlace de la capa K de dicho átomo.

Por ejemplo, en un ánodo de Tungsteno los electrones de la capa K tiene una energía de 69,4 keV; en un tubo radiógeno cuya diferencia de voltaje entre

cátodo y ánodo sea de 50 kV, la máxima energía de los electrones incidentes será 50 keV, por lo que serán incapaces de liberar electrones de la capa K y no existirá radiación característica. Pero si será posible si la diferencia de voltaje fuera de 80 kV.

El tipo de espectro que da este tipo de radiación es **discontinuo o discreto**, a saltos, picos de energía bien definidas que corresponden a las diferencias energéticas entre las diferentes capas involucradas. (Ver Figura 5.4)

Para los rayos X de diagnóstico la radiación característica puede suponer aproximadamente un 15 -25% de la radiación ionizante producida.

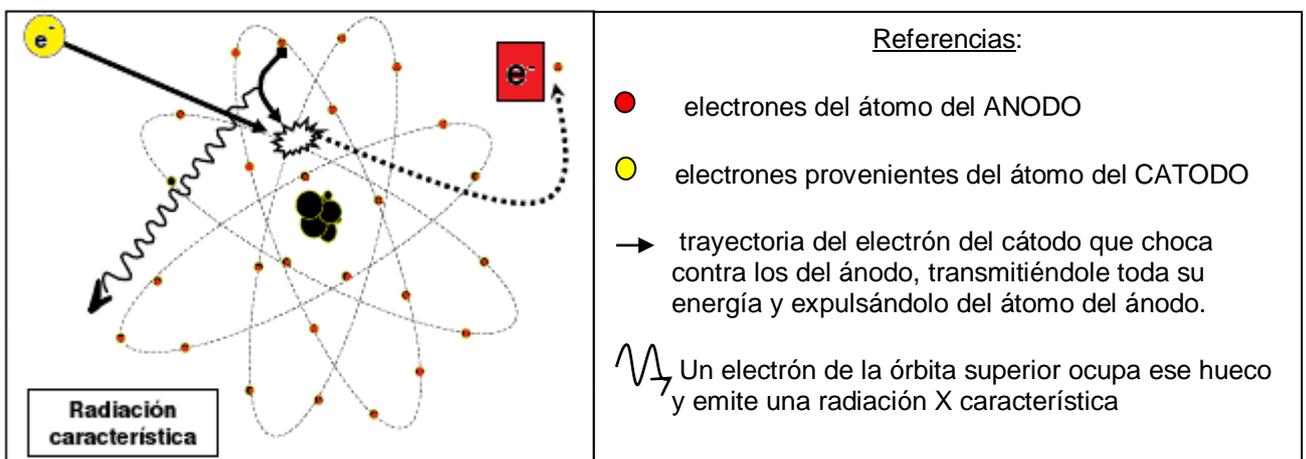


Figura 5.3

ESPECTRO DE RAYOS X CARACTERÍSTICOS

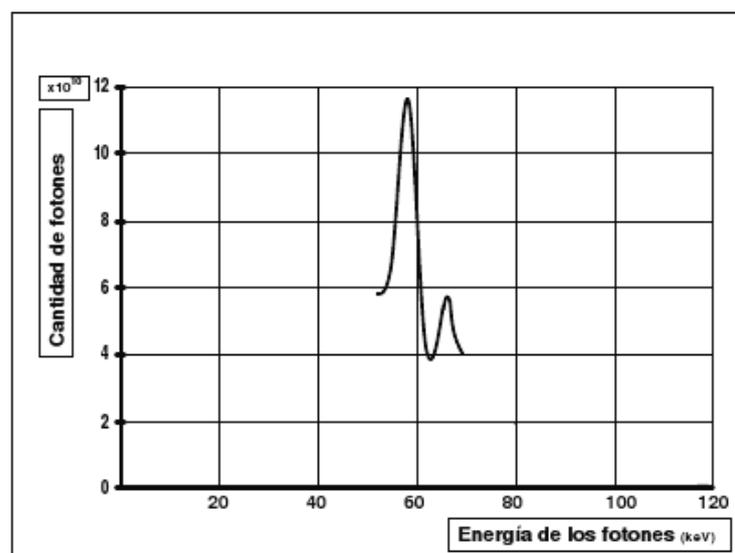


Figura 5.4

5.3 ESPECTRO DE LOS RAYOS X

Consta de la suma de los dos mecanismos anteriormente expuestos: una parte **continua** producida por la radiación de frenado y de una parte **discreta** en forma de picos que se superpone a la anterior. Estos picos corresponden a la radiación característica. (Ver Figura 5.5)

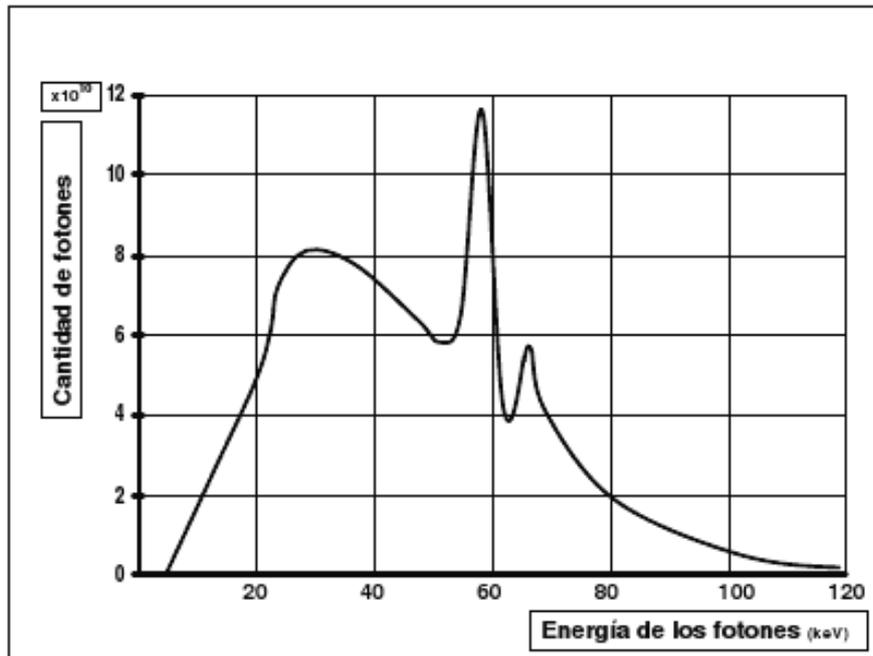


Figura 5.5

6. RAYOS X APLICADOS EN EL DIAGNÓSTICO

6.1 FACTORES QUE MODIFICAN LA CANTIDAD Y CALIDAD DE LOS RAYOS X

En el espectro de rayos X que se ha descrito, el número de rayos X emitidos es equivalente al área bajo la curva (Ver figura 5.5 y 6.1). Cuanto más hacia la derecha esté el espectro, mayor será la energía efectiva o **calidad** de los rayos X y cuanto mayor sea el área bajo la curva, mayor será la intensidad o **cantidad** de los rayos X.

La forma del espectro depende de una serie de factores como la filtración, el kilovoltaje y miliamperaje, el tiempo de exposición, la distancia focal y la longitud de onda del haz de rayos X.

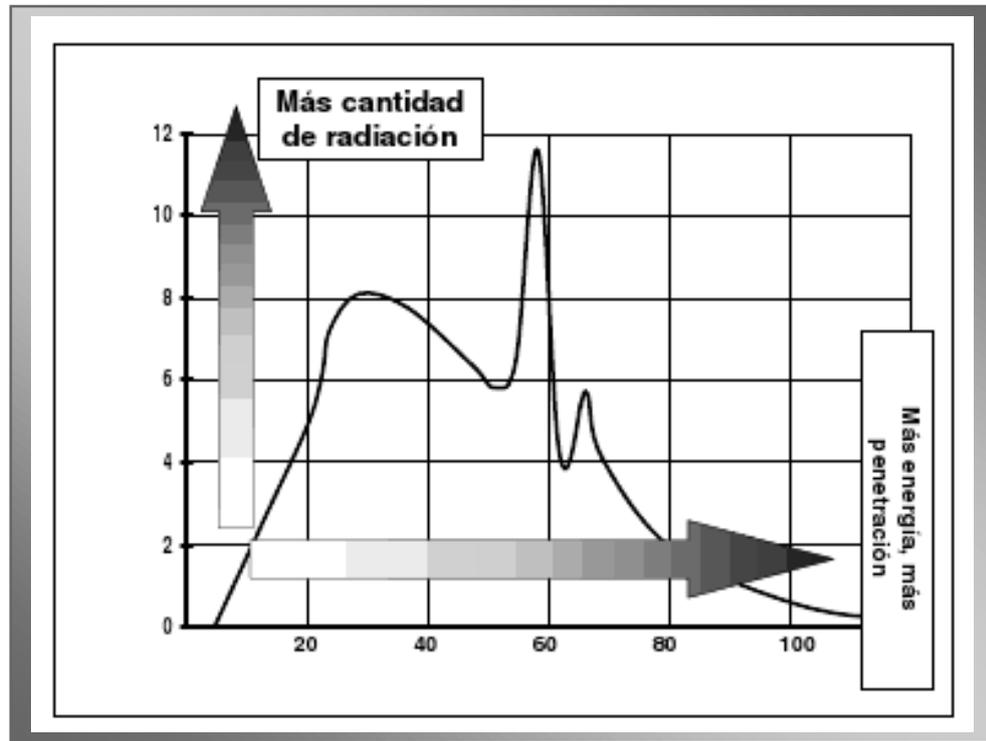


Figura 6.1

6.1.1 LONGITUD DE ONDA

La **longitud de onda**, λ , de las radiaciones X generales, **disminuye** a medida que la **diferencia de potencial** aplicada entre los electrodos del tubo (cátodo y ánodo) **es mayor**. Los rayos X con menor λ , tienen mayor poder de penetración de la materia sobre la cual inciden. La explicación de este comportamiento es que al aumentar la energía cinética del electrón que es acelerado hacia el ánodo, al chocar contra él, se transformará por el mecanismo ya descrito, en radiación E.M. de tipo X, con una frecuencia que satisface la ecuación:

$$E = h \cdot f \quad \text{siendo } h, \text{ la constante de Planck y } f, \text{ la frecuencia.}$$

Dado que E° es equivalente al producto del voltaje, V por la carga del electrón, q_{e^-} , resulta:

$$V \cdot q_{e^-} = h \cdot f$$

A su vez, frecuencia, $f = c / \lambda$, luego: $V \cdot q_{e^-} = h \cdot c / \lambda$

Reordenando la expresión:

$$V \cdot \lambda = h \cdot c / q_e$$

Siendo h, c y q_e constantes, se puede expresar:

$$V \cdot \lambda = k \text{ (constante)}$$

Esta última ecuación es la expresión analítica de la **Ley de Wien**: “ El producto del voltaje aplicado entre el cátodo y el ánodo por la longitud de onda de los rayos X emitidos es igual a una constante”.

El valor de K es igual a **12. 395 Voltios . nm** . Se puede expresar la igualdad:

$$V = \frac{12 \cdot 395 \text{ V} \cdot \text{nm}}{\lambda} \quad \lambda = \frac{12 \cdot 395 \text{ V} \cdot \text{nm}}{V}$$

Por medio de estas expresiones se pueden calcular el **voltaje máximo** y la **longitud de onda límite**. Además, se observa la **proporcionalidad inversa** entre ambas.

Existen calidades de rayos X , clasificados como: rayos blandos, rayos medios y rayos duros. Los rayos X blandos corresponden a una onda efectiva de 0,5 nm. Los rayos medios, corresponden a una onda efectiva de 0, 45 nm y los duros a una onda efectiva de 0, 4 nm .

Cuando nos referimos a **calidad**, consecuentemente nos referimos a **grado de penetrabilidad** de la materia por parte de los rayos X.

Las relaciones que se deben tener presentes, son:

<i>Tipos de rayos X</i>	<i>Longitud de onda (nm)</i>	<i>Voltaje (kV)</i>	<i>Poder de penetrabilidad</i>
BLANDOS	0,5	50 a 60 kV	(-)
INTERMEDIOS	0,45	60 - 75 kV	(+)
DUROS	0,40	75 - 100 kV	(+ +)

La longitud de onda de los rayos X, depende del voltaje aplicado, por la razón antes dicha relacionada con la energía cinética del electrón que sale del cátodo. Este electrón, según su energía al chocar contra el anticátodo, puede generar el salto de un electrón del material del anticátodo de cualquiera de sus órbitas, provocando que al volver este electrón a su nivel de energía, emita una radiación X de longitud de onda propia del nivel.

También la longitud de onda está en dependencia con el número atómico (Z) del metal del anticátodo. Se ha podido establecer que hay una relación lineal entre la raíz cuadrada de la frecuencia de la radiación emitida con el Z del metal del anticátodo (**Ley de Moseley**)

Así como a menor λ , el rayo X tiene mayor poder de penetración, la absorción de la energía portada por el mismo es inversa. Según las mediciones de Bragg y Oierce, la absorción de la radiación satisface la ecuación:

$$\text{Absorción} = Z^4 \cdot \lambda^3 \cdot k$$

Siendo: k un factor dependiente del material considerado

De lo expresado se desprende que los rayos X blandos (mayor longitud de onda) presentan mayor absorción en los tejidos.

6.1.2 FILTRACIÓN

El objetivo es reducir más la parte del espectro de baja energía que la de la alta, es decir, **atenuar** de esta forma los fotones X **denominados blandos** o poco energéticos que no van a influir en la imagen radiográfica por ser totalmente absorbidos por el paciente. Logrando también una mayor capacidad de penetración en los tejidos. La eliminación de los rayos X blandos disminuye la irradiación del paciente sin afectar la calidad de la imagen.

Para conseguir este objetivo se utilizan los filtros, materiales que se interponen en la trayectoria del haz de rayos X y absorben los fotones pocos energéticos. Tradicionalmente pueden diferenciarse dos tipos de **filtración: la inherente y la añadida** (Ver Figura 6.2)

- **Filtración inherente:**

La producida por los materiales estructurales del tubo radiógeno (vidrio pirex, aceite mineral, etc) que simplemente por encontrarse allí absorben algunos fotones.

- **Filtración añadida:**

La originada por colocar intencionalmente materiales a la salida del haz de rayos X antes que incida con el paciente. El material utilizado es un disco de aluminio de mayor o menor espesor.

Mientras, mayor sea el espesor de la placa de aluminio se logrará mayor absorción de los rayos X blandos. (Ver Figura 6.3)

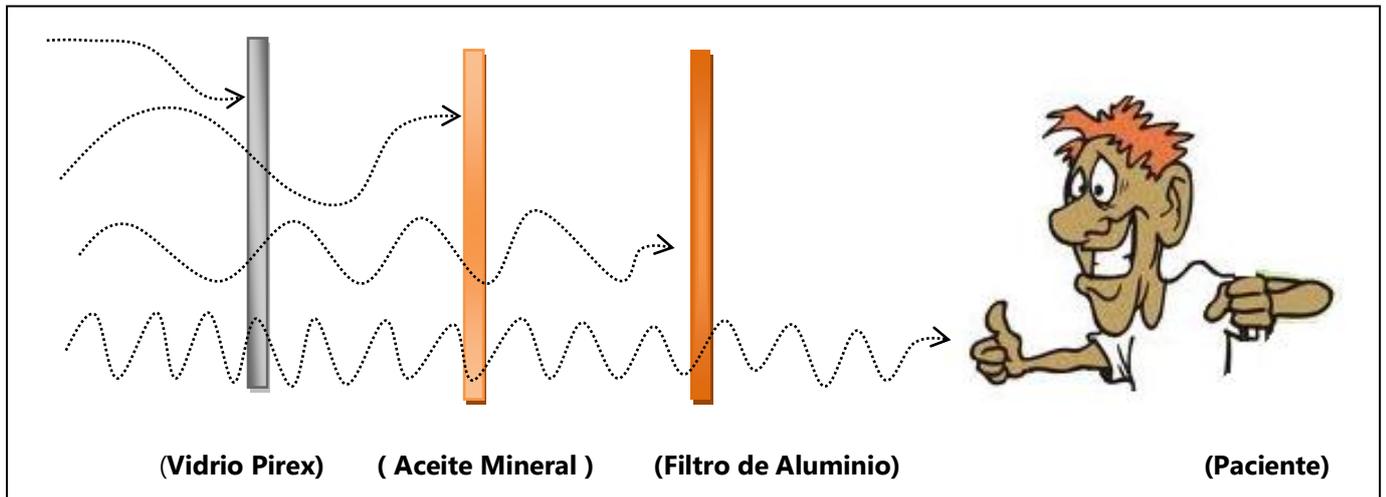
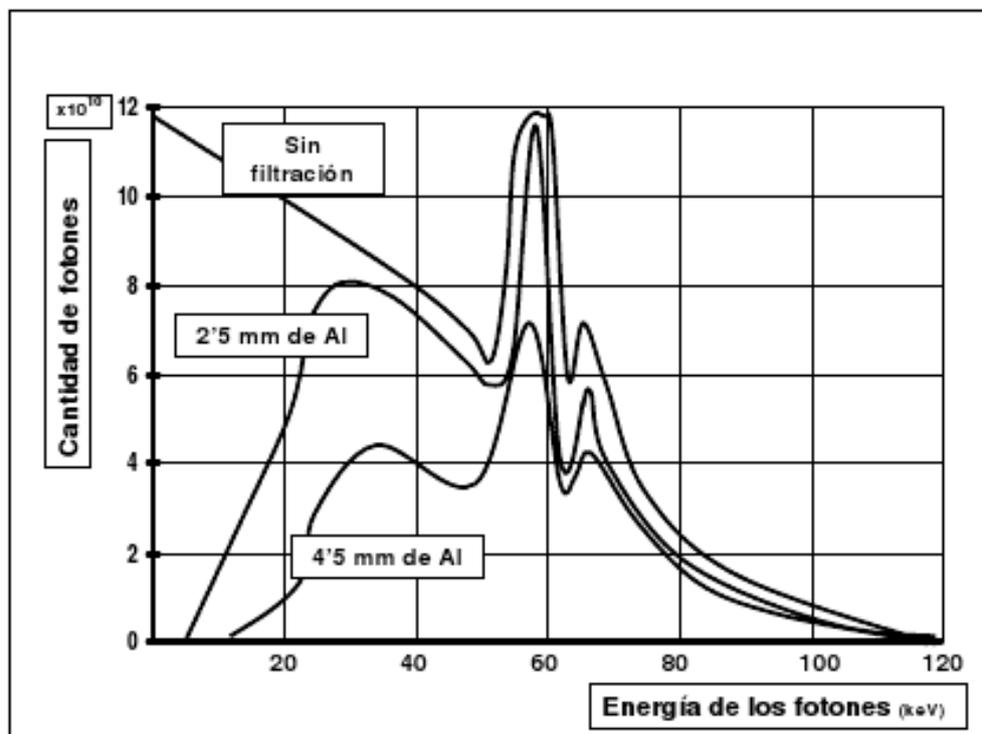


Figura 6.2



Filtración: modificación del espectro de rayos X.

Figura 6.3

6.1.3 KILOVOLTAJE

Mediante un transformador del tubo radiógeno se puede elevar el kilovoltaje, es decir se puede regular la diferencia de potencial que se aplica al tubo entre el cátodo y el ánodo. Y así, se pueden obtener mayor número de fotones de mayor energía y mayor poder de penetrabilidad..

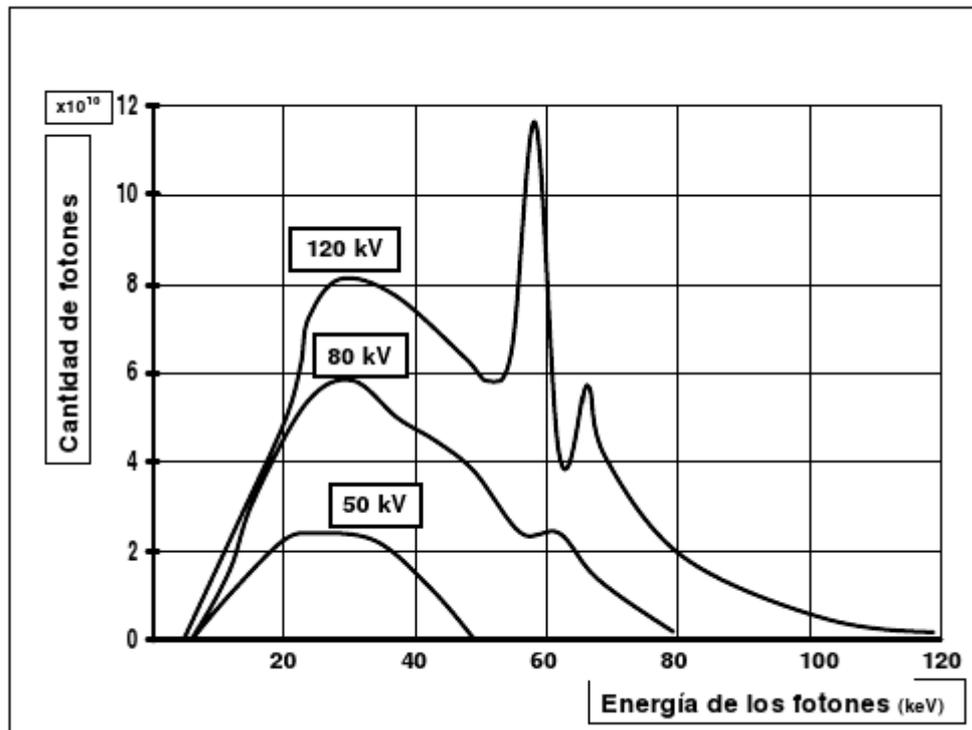


Fig. 7.19. Kilovoltaje: modificaciones en el espectro de rayos X.

6.1.4 MILIAMPERAJE

Mediante un transformador se incrementa la tensión de la energía eléctrica del tubo radiógeno a un valor deseado. Fundamentalmente **el aumento del mA** produce un **aumento de la cantidad de fotones X** que se producen en el tubo; por lo tanto, aumenta la intensidad de los rayos X producidos. (Ver figura 6.4)

La cantidad de rayos X producidos (intensidad de rayos X) es proporcional a la cantidad de electrones que son acelerados desde el cátodo y el número de éstos electrones, está en relación con la intensidad de corriente de alta tensión. Prácticamente, la intensidad de los rayos X se calcula mediante el producto del miliamperaje aplicado y el tiempo. En los aparatos de uso diagnóstico, el miliamperaje es constante, por lo cual, la intensidad se modificará conforme se modifique el **tiempo** durante el cual la corriente acelera a los electrones. En otras palabras, a **mayor tiempo de exposición, mayor intensidad de radiación X con miliamperaje constante.**

$$I_{RX} = I \text{ (mA)} \cdot t \text{ (de exposición)}$$

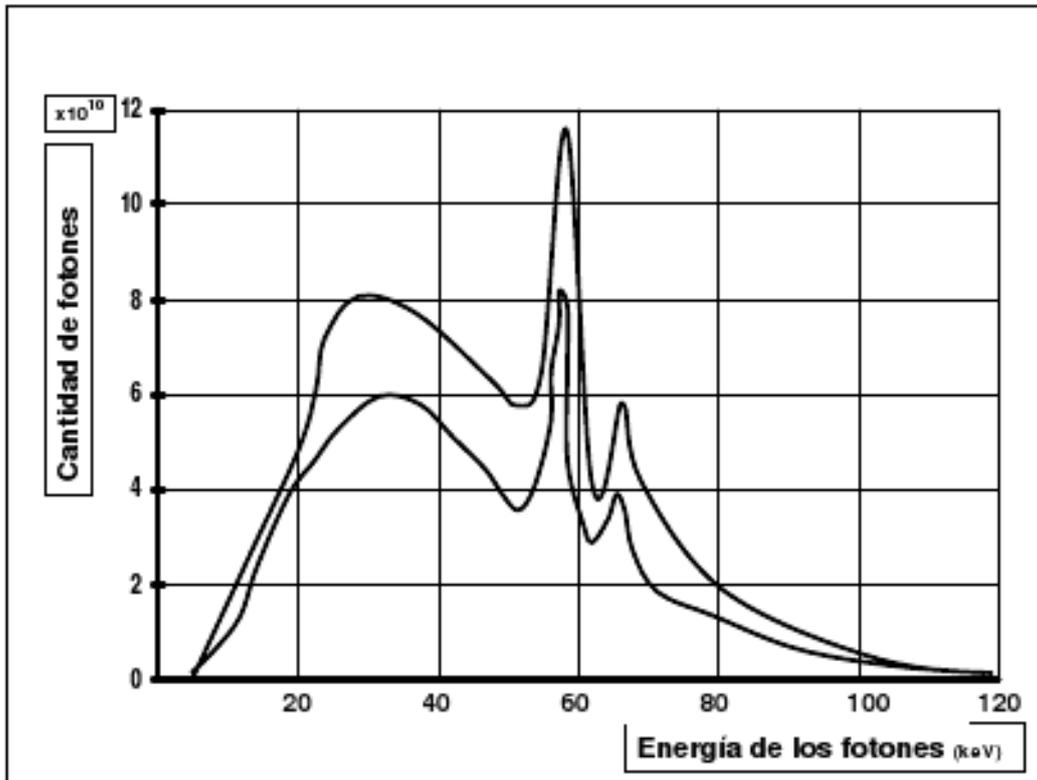


Figura 6.4

6.1.5 DISTANCIA FOCAL

En las técnicas radiográficas interesa tanto la cantidad de rayos emitidos por el tubo radiógeno, como la cantidad de rayos que llegan al objetivo de estudio (placa radiográfica en la zona a radiografiar)

Como los rayos X que salen del tubo radiógeno presentan divergencia, aunque estén colimados, a medida que la **distancia a la placa es mayor menor será la cantidad de rayos** que llegan a la misma. Se cumple así el principio: “cuando un haz de rayos incide normalmente sobre una pantalla, la cantidad de radiación que ésta recibe por unidad de superficie variará en **proporción inversa al cuadrado de la distancia**”.

$$I_A \cdot d_A^2 = I_B \cdot d_B^2$$

La intensidad del rayos X disminuye al cuadrado de la distancia. Si se duplica la distancia de la fuente, el área irradiada del paciente **B** es cuatro veces el área de irradiada del paciente **A**, por lo que la radiación de unidad de área de **B** es la cuarta parte de la de **A**. (Ver Figura 6.5)

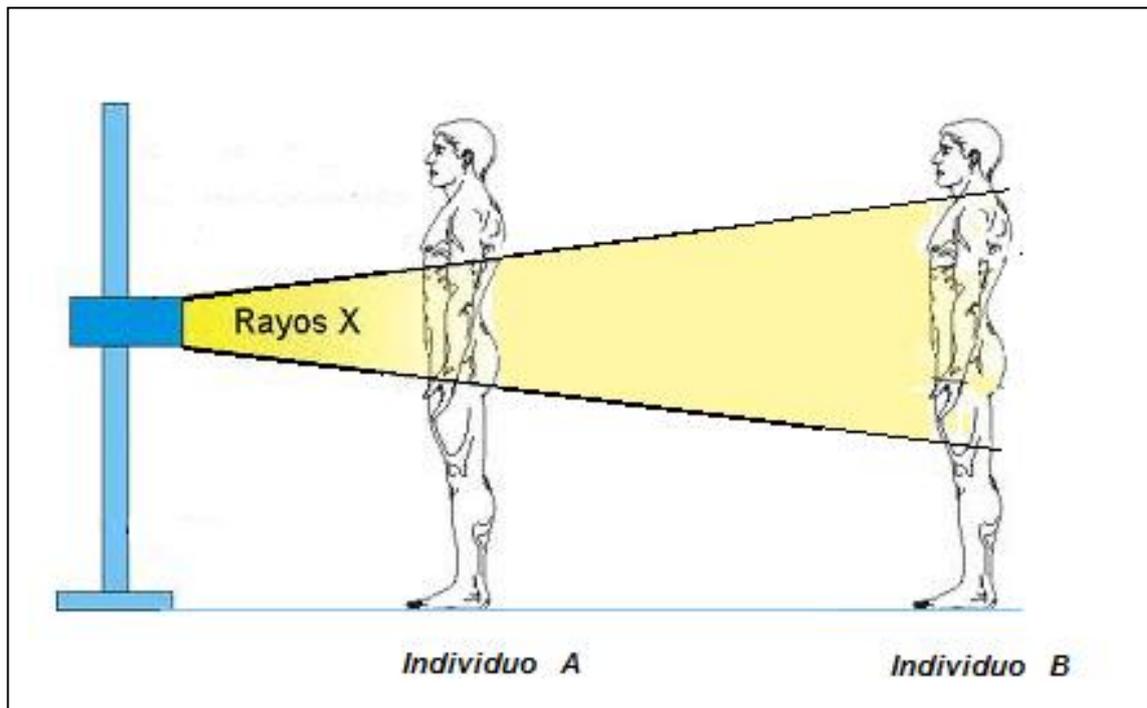


Figura 6.5

6.1.6 Resumen:

La cantidad y calidad de los rayos X de uso diagnóstico depende del control de ciertos parámetros.

<i>PARÁMETRO</i>	<i>CALIDAD</i>	<i>CANTIDAD</i>
<i>kV (↑)</i>	<i>Aumenta (↑)</i>	<i>Aumenta (↑)</i>
<i>mA (↑)</i>	<i>No cambia</i>	<i>Aumenta (↑)</i>
<i>Tiempo de exposición (↑)</i>	<i>No cambia</i>	<i>Aumenta (↑)</i>

<i>Filtración (↑)</i>	<i>Aumenta (↑)</i>	<i>Disminuye (↓)</i>
-----------------------	--------------------	----------------------

6.2 PRINCIPIOS DE RADIOLOGÍA DIGNÓSTICA

La radiología diagnóstica o el radiodiagnóstico, utiliza los rayos X para obtener la **imagen** de un órgano que es alcanzado por esta radiación. Está basado en la **atenuación** de los rayos X que atraviesan los órganos.

La **imagen radiológica** es la imagen constituida por las “sombras” que se proyectan sobre una “pantalla” que es la **placa radiográfica**. Las diferentes intensidades que adquiere la imagen radiológica se debe a la diferencia en las **densidades** de los tejidos, los cuales muestran diferente capacidad de **absorción** de los rayos X.

La intensidad de un haz de rayos X se reduce cuando interacciona con la materia. Cuando el haz llega al paciente ocurren varios fenómenos:

1. **ABSORCIÓN** con pérdida total de la energía
2. **DISPERSIÓN** con algo de absorción y pérdida de energía, o bien, sin pérdida de energía.

A ambos fenómenos se lo llama **ATENUACIÓN**, es decir la reducción de la intensidad del haz X causado por absorción y dispersión

3. Pueden **ATRAVESAR** al paciente sin haber interacción.

Cuando los rayos X llegan al paciente algunos fotones lo atraviesan completamente y llegan a la placa radiográfica, mientras que otros reducen su energía porque son dispersados (cambian su dirección con o sin pérdida de energía) y llegan a la placa, o porque son absorbidos por el paciente sin llegar a la placa. (Ver Figura 6.6)

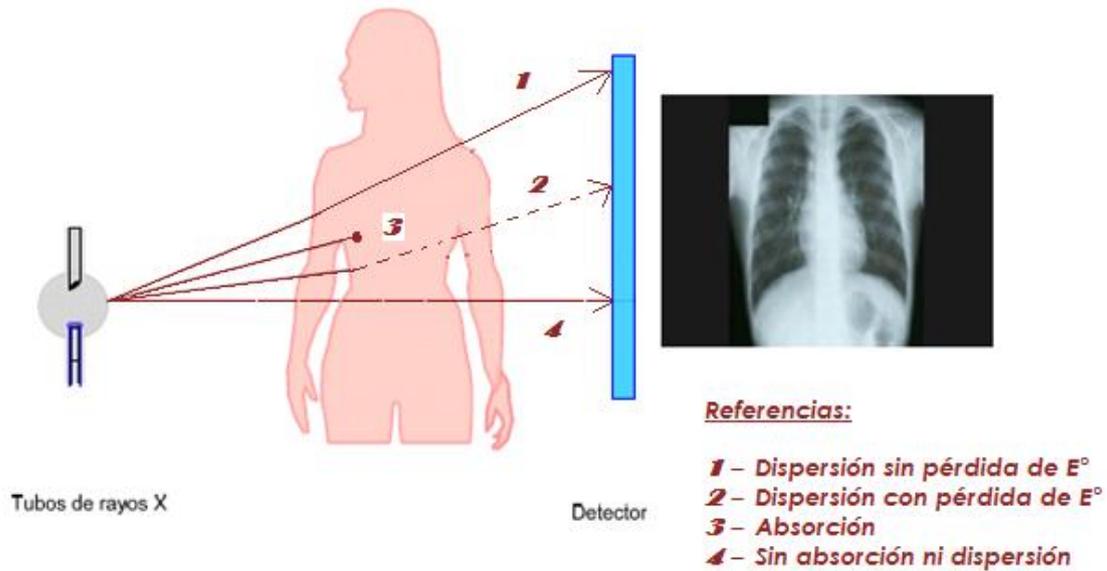


Figura 6.6

La magnitud llamada **coeficiente de atenuación lineal** de los tejidos es lo que determina el **contraste** mostrado por una imagen radiológica.

Tal coeficiente sufre modificaciones con variables tales como el **espesor** del material; en este caso, a medida que el espesor es mayor, el coeficiente de atenuación es menor y consecuentemente, aumenta la **dispersión de la radiación**.

A mayor absorción menor penetración, este fenómeno depende de varios factores:

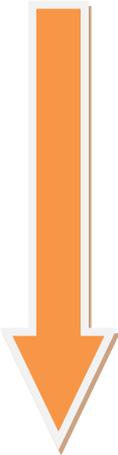
NUMERO ATÓMICO	<i>A mayor Z</i>	<i>Mayor absorción</i>
DENSIDAD de la estructura irradiada	<i>A mayor densidad</i>	<i>Mayor absorción</i>
ESPESOR de la estructura irradiada	<i>A mayor espesor</i>	<i>Mayor absorción</i>
KILOVOLTAJE	<i>A menor kV</i>	<i>Mayor absorción</i>

En el radiodiagnóstico los límites en la clasificación descripta no son matemáticos. Si la cantidad de rayos que pueda absorber un material, depende

de la cuarta potencia de **su Z** (ecuación de Braggs y Pierce), teniendo en cuenta que los tejidos son una mezcla de diferentes átomos, sólo se puede prever que aquellas estructuras conformadas por átomos de Z alto en promedio, sean las determinantes de que el tejido sea radiopaco o no. Por ej. en el tejido óseo hay un predominio de Calcio que condiciona la densidad radiográfica. También, en el caso de una prótesis metálica, por ej. será factible observarla por este medio con bastante precisión, dado que los metales tienen usados en prótesis tienen alto Z.

También la **densidad físico-química** (relación masa / volumen) está relacionada con la absorción de la radiación X: cuanto mayor densidad, mayor radioabsorción.

En el cuerpo humano podemos encontrar cinco **densidades** diferentes fundamentales:

ABSORCIÓN	PENETRACIÓN	COMPOSICIÓN	EJEMPLO	PLACA
 <p>MENOR (-)</p> <p>MAYOR (+)</p>	 <p>MAYOR (+)</p> <p>MENOR (-)</p>	AIRE	Engloba aire u otros gases que se encuentran en tubo digestivo, pulmones, etc	NEGRO
		GRASA	La encontramos entre músculos, abdomen, etc	GRIS
		AGUA	Presente en músculos, vasos, intestino	GRIS PALIDO
		CALCIO	En huesos, cartílagos, dientes	BLANCO
		METAL	No esta en forma natural ene le organismo sino marcapasos, almagamas en dientes,	BLANCO ABSOLUTO

Por ejemplo consideremos las **densidades** de **tejidos duros** como:

- Hueso esponjoso.....1, 15
- Hueso compacto.....1, 85
- Cemento dental.....2, 00

Dentina.....	2, 10
Esmalte dental.....	2, 95

Otro factor no menos importante y que será considerado en detalle en radiología odontológica, mencionamos el **espesor** del cuerpo o de estructuras: Un aumento del espesor del cuerpo que se antepone a la placa radiográfica hace que la probabilidad de absorción de los fotones sea mayor. Mientras que el aumento de espesor sigue una progresión aritmética, la absorción sigue a una progresión geométrica. Las variaciones en espesor y según la incidencia de los rayos X darán tonos diferentes a la imagen radiográfica.

6.3 OBTENCIÓN DE LA IMAGEN RADIOGRÁFICA

La imagen radiológica se “imprime” en la placa radiográfica, que es una plantilla de celuloide cubierta por una emulsión de bromuro de plata. Cada vez que la radiación X incide en una porción de superficie de la placa radiográfica, “facilita” la reducción del catión plata monovalente a plata metálica mediante agentes químicos, la cual se depositará sobre el gel que cubre la placa de celuloide. El “revelado” de la placa consiste en un procedimiento químico por el cual, el haluro de plata “sensibilizado” por los fotones X será reducido a plata metálica mediante agentes químicos reductores.

Al revelado sigue un proceso de “frenado” del revelado con un simple enjuague con agua. Y se procede al “fijado” de la imagen, lo cual tiene por objeto eliminar el exceso del haluro de plata “no sensibilizado y reducido”. Quedará sólo la imagen negra de la plata.

Con un posterior lavado y secado se puede proceder a la observación de la imagen obtenida.

Según la cantidad de radiación que un cuerpo o un medio **absorbe** se lo clasifica en:

◆ **RADIOTRASPARENTE** (1)

Cuando el medio **absorbe** una cantidad de rayos **ínfima** y la placa radiográfica queda **oscura**, es decir, que la densidad de los granos de plata es alta. Por ej. cuando en el sitio radiografiado hay aire u otro material interpuesto como el acrílico. (Ver Figura 6.7)

◆ **RADIOLÚCIDO** (2)

Cuando el medio **absorbe medianamente** y los depósitos de plata sean de densidad débil. La placa queda **color gris**. Por ej. en el caso de tejidos como encías. (Ver Figura 6.7)

◆ **RADIOPACO** (3)

Cuando el medio o cuerpo **absorbe la totalidad** de los rayos X o gran parte de ellos, será mínima o nula la radiación remanente que puede “sensibilizar” el haluro de plata. Por lo tanto, los depósitos de plata serán mínimos o inexistentes y la placa radiográfica queda **blanca**. Por ej. El esmalte dental, una obturación con amalgama. (Ver Figura 6.7)



Figura 6.7

6.4 LA RADIACIÓN X COMO RADIACIÓN IONIZANTE

Los rayos X al igual que las radiaciones alfa, beta, gamma, cósmica, pueden producir ionizaciones en las moléculas sobre las que incide y es absorbida la energía que transportan.

Los aparatos de uso en radiología, emiten radiación ionizante, que a los fines de evaluar la incidencia de los efectos ionizantes, vale una clasificación en tres tipos: *haz primario o útil*, *radiación secundaria* y *radiación de escape*.

El *haz primario o útil* es emitido por el foco del anticátodo como un cono o haz, a través de la ventana del cabezal. Tiene dirección recta, de angulación controlable. En la figura 6.8 que sigue está indicado con el número 1.

La *radiación secundaria* es la emitida por los objetos alcanzados por los rayos primarios. Estas radiaciones de “rebote” pueden llegar al objeto de estudio (cabeza del paciente), como los rayos indicados con el número 2 en el esquema 6.8.

La *radiación de escape*, se propaga desde el tubo a cualquier dirección del espacio, a través de lugares fuera de la ventana de emisión. Estas radiaciones

se propagan por fallas en el blindaje del cabezal. En el esquema 6.8 figuran con el número 3.

Las dos últimas radiaciones son de consideración para la técnica radiográfica como para la radioprotección.

En el esquema que sigue pueden observarse los rayos mencionados.

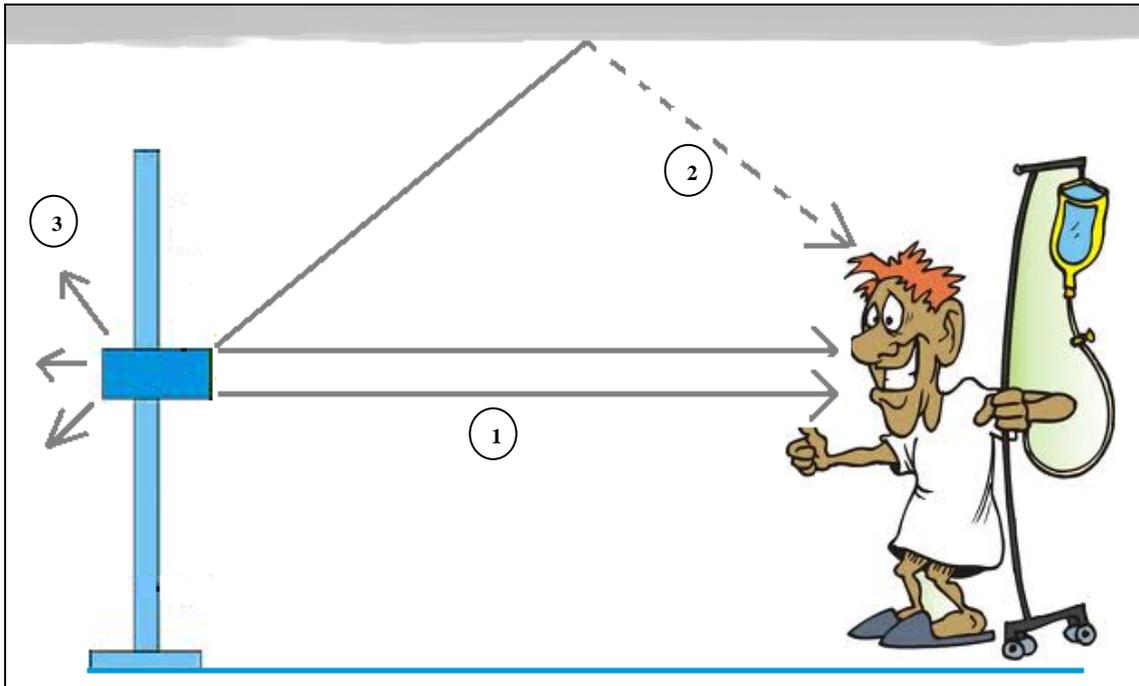


Figura 6.8

6.5 ACCIÓN BIOLÓGICA DE LOS RAYOS X

Los efectos nocivos de los rayos X son válidos para toda radiación ionizante y se puede estudiar en fases como las que se presentan a continuación, sin que ello no implique efectos simultáneos.

a) **Fase de reacción físico-química:** Esta fase se puede resumir en una serie de sucesos especialmente referidos a la interacción con el agua, que es la molécula más frecuente en los tejidos. Tales efectos se pueden secuenciar como:

*Excitación de la molécula que absorbe la energía de la radiación X, seguida de ionización. Ej radiolisis del agua

* Generación de productos de ionización con alto contenido en energía tales como los radicales libres que son muy reactivos. Ej. iones del agua y radicales libres del agua.

* **Recombinación y reacciones químicas de radicales libres.** Ej. reacción de formación de O_2 , de H_2O_2

b) **Fase de reacción bioquímica:** En esta fase, los rayos X pueden interactuar con cualquier molécula biológica, sobre la cual pueden generarse cambios transitorios o permanentes, tales como:

- Efectos sobre los enlaces puente de Hidrógeno y disulfuro entre cadenas peptídicas, entre aminoácidos y la estructura cuaternaria de las proteínas. La ruptura de estos puentes genera cambios conformacionales a las proteínas lo cual puede significar una alteración funcional (caso de las enzimas, anticuerpos, receptores, etc)
- Efectos sobre los enlaces de los ácidos nucleicos y sobre nucleótidos, de consecuencias variables, hasta la mutación genética.
- Efectos sobre las moléculas de lípidos

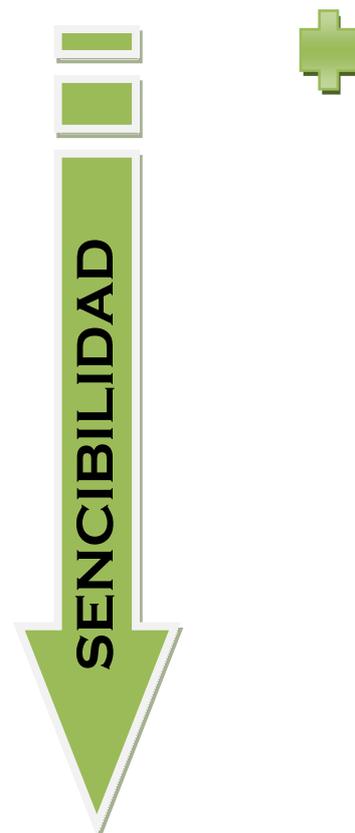
c) **Fase de efecto biológico** a nivel de estructuras celulares, subcelulares, tejidos y órganos: Se pueden hacer las apreciaciones siguientes:

- El efecto es variable, dependiendo de la **sensibilidad** de las células irradiadas (tipo, morfología, estado evolutivo).
- En general, el efecto es más intenso en sistemas de mayor actividad reproductiva, de mayor potencia cariocinética y menor diferenciación morfológica y funcional.
- El efecto sobre los órganos, puede afectar su funcionalidad, desde las fases metabólicas hasta sus funciones específicas.

LESIONES SOMÁTICAS

La irradiación repetida conduce a una **sumación de efectos**, dependiendo de la **sensibilidad** del órgano. Por ej. la sensibilidad de los órganos en sentido decreciente, se puede resumir así:

- * **Embrión**
- * **Feto**
- * **Órganos linfáticos**
- * **Médula ósea**
- * **Tracto intestinal**
- * **Ovarios**
- * **Testículos**
- * **Capilares**
- * **mucosas, glándulas salivales**



* **zonas de crecimiento óseo (metáfisis)**

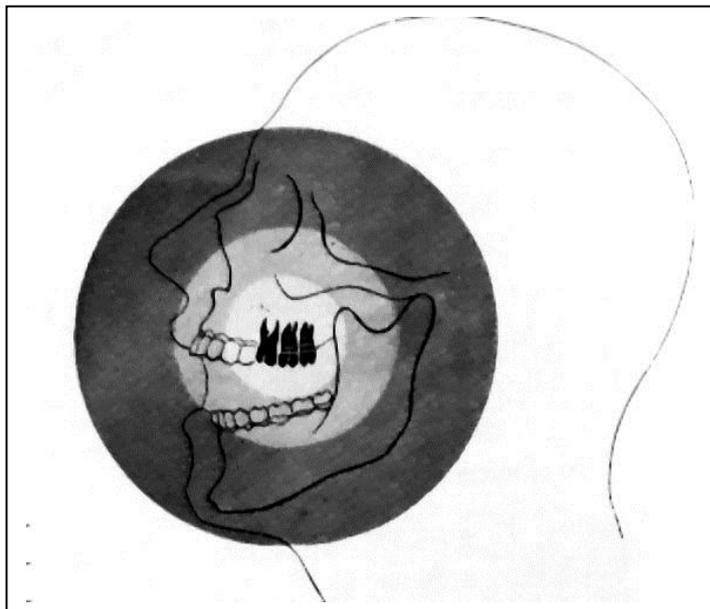
* **mamas**



6.6 MEDIDAS DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA X GENERALES

Para el paciente:

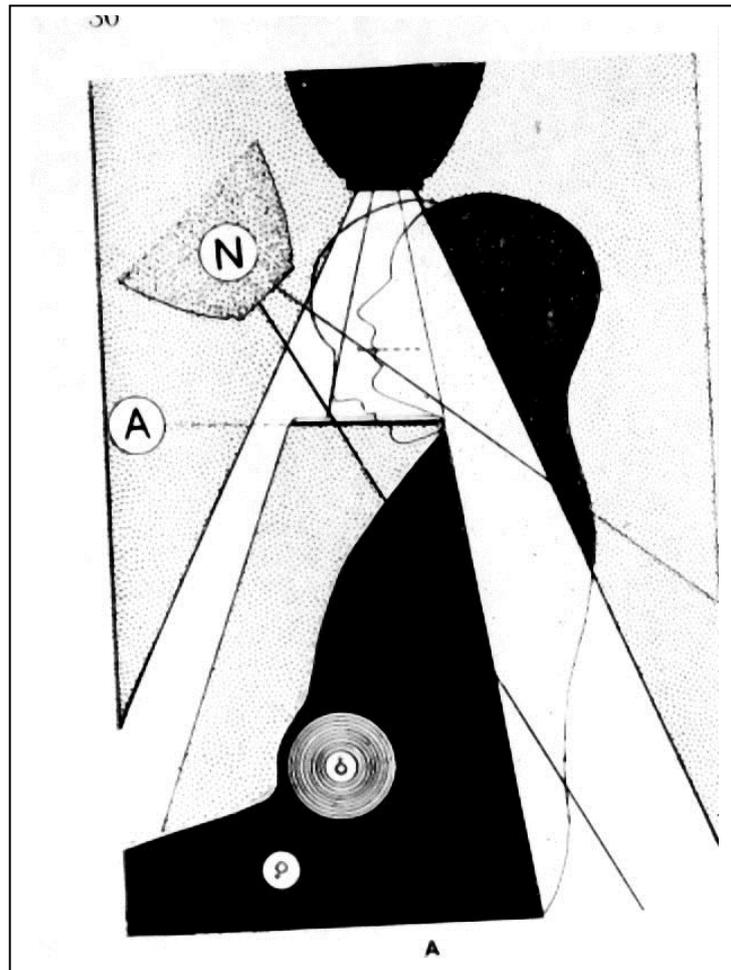
- Filtración de rayos “blandos” o de mayor λ , mediante láminas de metal, por ej. Al (1, 5 mm de espesor) , para evitar la absorción por la piel de esta radiación.
- Diagramación y colimación: reducir la sección y determinar la dirección del haz primario.
- Reducir la sección de irradiación con el diafragma, como se diagrama en el esquema siguiente:



El uso del diafragma reduce el volumen de tejido irradiado y también reduce la cantidad de rayos secundarios que puedan generarse.

- Reducción del tiempo de exposición: uso de películas radiográficas rápidas y ultrarrápidas.
- Aumento del kV : disminuye la formación de rayos “ blandos “ más fácilmente absorbidos por la piel.
- Aumento de la distancia foco-piel: la divergencia de los rayos es mayor, a medida que es mayor la distancia, por lo cual, disminuye la irradiación recibida.
- Uso de pantallas anti-rayos X:pueden ser delantales plomados y pantallas submandibulares plomadas.

La figura que sigue muestra un diagrama sobre la radioprotección gonadal-prenatal, mediante el uso de la pantalla submandibular y el delantal, que proporcional casi el mismo margen de protección. En caso de no contar con pantalla ni delantal, se sugiere flexionar completamente la cabeza, evitando que los rayos primarios alcancen la región gonadal.



Nota: En el diagrama, N indica la fuente emisora de rayos X y A, indica un delantal plomado o una pantalla submandibular.

Para el profesional:

- * Evitar el haz primario.
- * Uso de pantallas anti-rayos X.

* Distancia adecuada.

*Uso de dosímetros para control de dosis.

VALORES LÍMITES PERMISIBLES DE LA SOBRECARGA POR RADIACIONES

A- Dosis total para personal sanitario y pacientes.

* Un radiólogo de 40 años, la dosis total recibida no debe sobrepasar $1,1 \text{ J / kg} = 110 \text{ rems}$.

* Una persona no expuesta, la dosis total no debe sobrepasar, en el período de capacidad reproductiva, el valor es de $50 \text{ mJ / kg} = 5 \text{ rems}$.

B- Dosis anual para personal sanitario y pacientes expuestos a radiaciones.

* Personal expuesto a rayos X, dosis gonadal límite: $50 \text{ mJ / kg} = 5 \text{ rems / año}$; $1 \text{ mJ / kg} = 0,1 \text{ rem por semana}$.

* Mujeres en edad fértil (menores de 45 años) no deben recibir en el abdomen más de $13 \text{ mJ / kg} = 1,3 \text{ rems por trimestre}$.

* Persona no expuesta a radiaciones, no debe sobrepasar los $5 \text{ mJ / kg} = 0,5 \text{ rem por año}$.

7. MEDICION DE LAS RADIACIONES X (IONIZANTES EN GENERAL)

Se consignan seguidamente, diferentes unidades de medición de las radiaciones en general, de las cuales nos interesan algunas, aquellas que marcan el efecto biológico y las que indican parámetros de radioprotección. Así mismo, el estudiante debe conocer la existencia de otras medidas con sus unidades que son de interés diverso, como por ej. la medida de una fuente de radiación

Unidad de dosis absorbida (dosis de energía):

rad / g ; Gy (gray) = J / Kg = 100 rads

Unidad de la dosis de efecto (dosis biológica efectiva):

Unidad de dosis absorbida x factor de calidad de la radiación (para rayos X el factor es 1)

rem ; Sv (Sievert) = 1 J / Kg = 100 rems

Unidad de dosis de exposición (efecto ionizante):

Depende de la calidad de la fuente de radiación

Ci (curio) ; Bq (bequerel) = 1 desintegración / s

EFFECTOS SEGÚN LAS DOSIS

Tomando como ejemplo los efectos sobre la **piel**:

* 0, 35 Gy hasta 1 Gy : no hay efecto visible, pero puede alterar las mitosis en la capa germinal.

* 2 Gy a 3 Gy : ligero enrojecimiento.

* 5 Gy a 7 Gy (800 – 1000 rads): fuerte eritema

* 8 Gy a 10 Gy: pérdida de glándulas sebáceas y sudoríparas y de folículo pilosos. Atrofia cutánea.

* 25 Gy a 80 Gy: úlceras hasta cáncer de piel.

IRRADIACION DE CUERPO ENTERO

La irradiación local y fraccionada de 60 Gy (= 6 000 rads) no representa amenaza para la vida.

La irradiación de 6 Gy (= 600 rads) en única dosis y en cuerpo entero, es mortal.

Ej. una dosis de $155 \text{ mC} / \text{Kg} = 600 \text{ R}$ de irradiación de cuerpo entero, lleva a la muerte a la 2ª semana.

EFECTOS TERATOGENICOS

Un óvulo fecundado, aún no implantado que recibe $100 \text{ mGy} = 10 \text{ rads}$) tiene alta probabilidad de padecer efectos **letales**.

Por la misma dosis, al final de la 6ª semana (final del desarrollo de los órganos), son posibles las **malformaciones**.

EFECTOS GENÉTICOS

Cuando la radiación afecta **dobles enlaces** en las uniones inter-atómicas en las moléculas del ADN, la lesión es irreparable y la gravedad del daño depende del órgano afectado, la naturaleza de la radiación y de la duración de la actividad de las mismas.

FACTORES DE RIESGO

- * Edad: A menor edad cronológica, mayor probabilidad de desarrollar alteraciones considerables, principalmente en órganos en desarrollo y crecimiento
- * Distancia a la fuente emisora: A mayor distancia, menor cantidad de radiación recibe el individuo expuesto.
- * Tiempo de exposición
- * Dosis recibida.

FUENTES BIBLIOGRAFICAS

- Manual de Radioprotección. Autoridad Regulatoria Nuclear, la Comisión Nacional de Energía Atómica y la Cámara de Instituciones de Diagnóstico Médico
- Los rayos X: unas ondas centenarias en el diagnóstico médico. Facultad de Medicina. Departamento de Ciencias Fisiológicas II
- <http://www.slideboom.com/presentations/130706/APARATO-Y-PRODUCCION-DE-RAYOS-X>
- <http://www.slideshare.net/katouchan2/radiologa-en-odontologa>

