



1. Interacciones entre los electrones y el blanco

- Calor del ánodo
- Radiación característica
- Radiación bremsstrahlung

2. Espectro de emisión de rayos X

- Espectro de rayos X característicos
- Espectro de rayos X de bremsstrahlung o reducción de frenado

3. Factores que afectan al espectro de emisión de rayos X

- Efecto del mA y los mAs
- Efecto del kVp
- Efecto de la filtración añadida
- Efecto del material del blanco
- Efecto de la forma de onda del voltaje



1. Discutir las interacciones entre los electrones proyectil y el blanco del tubo de rayos X.
2. Identificar los rayos X característicos y la radiación *bremsstrahlung* (radiación de frenado).
3. Describir el espectro de emisión de rayos X.
4. Explicar cómo los mAs, el kVp, la filtración añadida, el material del blanco y el rizado del voltaje afectan al espectro de emisión de rayos X.



La energía cinética es la energía del movimiento.



ENERGÍA CINÉTICA

$$EC = \frac{1}{2}mv^2$$

donde m es la masa en kilogramos,
 v la velocidad en metros por segundo y
 EC la energía cinética en julios.



En la determinación de la magnitud de la energía cinética de un proyectil, la velocidad es más importante que la masa. En un tubo de rayos X el proyectil es el electrón. Todos los electrones tienen la misma masa; por consiguiente, la energía cinética de los electrones aumenta al incrementar el kVp. Al aumentar la energía cinética de los electrones, tanto la intensidad (cantidad) como la energía (calidad) del haz de rayos X aumentan también.



Con 100 mA, por ejemplo, 6×10^{17} electrones viajan cada segundo del cátodo al ánodo del tubo de rayos X.

En un sistema de imagen por rayos X que funcione a 70 kVp, cada electrón llega al blanco con una energía cinética máxima de 70 keV.



$$(70 \text{ keV}) (1.6 \times 10^{-16} \text{ J/keV}) = 1.12 \times 10^{-14} \text{ J}$$

Al haber $1,6 \times 10^{-16} \text{ J}$ por 1 keV



Sustituyendo esta energía en la expresión de la energía cinética y despejando (o calculando) la **velocidad de los electrones**, se obtiene el siguiente resultado:

$$EC = \frac{1}{2}mv^2$$

$$v^2 = \frac{2EC}{m}$$

$$v^2 = \frac{(2)(1,2 \times 10^{-14} \text{ J})}{(9,1 \times 10^{-31} \text{ kg})}$$

$$= 0,25 \times 10^{17} \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$v = 1,6 \times 10^8 \text{ m/s}$$



$$EC = \frac{1}{2}mv^2$$

$$v^2 = \frac{2EC}{m}$$

$$v^2 = \frac{(2)(1,2 \times 10^{-14} \text{ J})}{(9,1 \times 10^{-31} \text{ kg})}$$

$$= 0,25 \times 10^{17} \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$v = 1,6 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Estos cálculos no son exactamente correctos; sin embargo, sirven para ilustrar un ejemplo y demostrar el uso de la ecuación anterior. De acuerdo con la teoría de la relatividad, la masa del electrón aumenta al acercarse a la velocidad de la luz; así, el valor real de v/c es **0,47 a 70 keV.**



Pregunta: ¿A qué fracción de la velocidad de la luz viajan los electrones de 70 keV?

Respuesta:
$$\frac{v}{c} = \frac{1,6 \times 10^8 \text{ m/s}}{3,0 \times 10^8 \text{ m/s}} = 0,53$$

ESPECTRO DE EMISIÓN DE RAYOS X

BREMSSTRAHLUNG

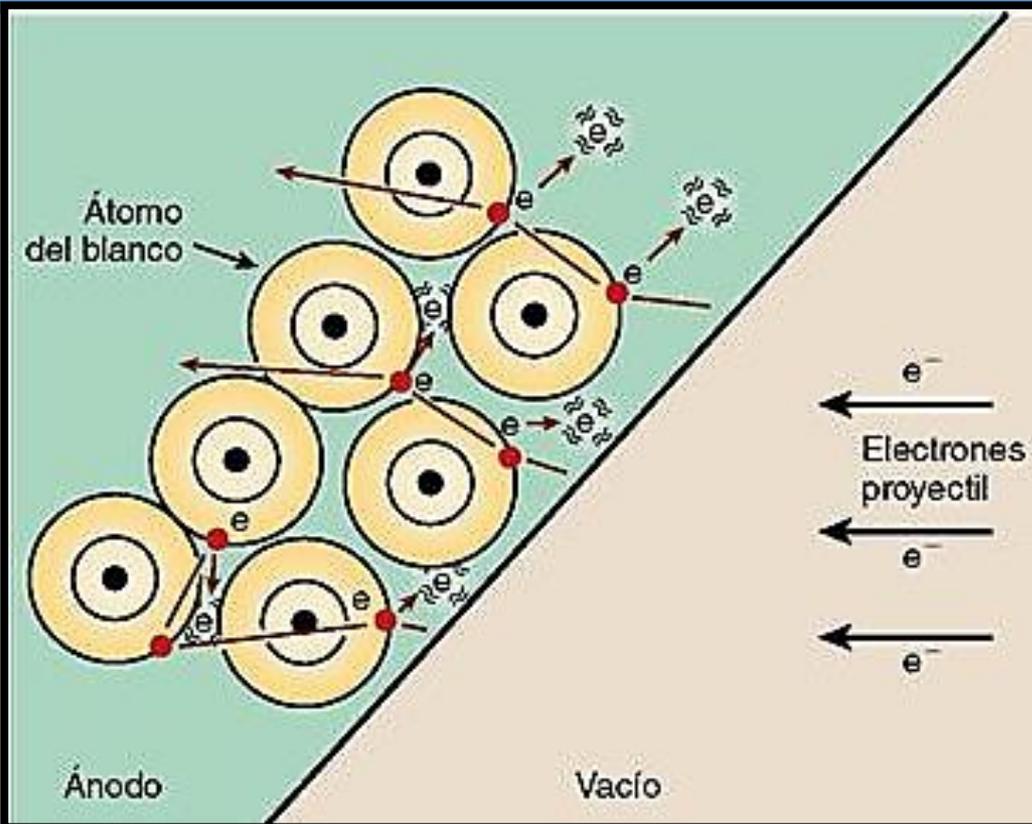


3. ¿A qué fracción de la velocidad de la luz viajan los electrones de 90 keV?



La distancia entre el filamento y el blanco del tubo de rayos X es de 1 cm, aproximadamente.

1. **los electrones inciden** en los átomos metálicos pesados del blanco del tubo de rayos X, **transfieren su energía cinética** a los átomos del blanco.
2. Cuando se producen, **los electrones proyectil se frenan y, finalmente, llegan casi a detenerse**, momento en el que son conducidos a través de la estructura del ánodo del tubo de rayos X y dirigidos hacia los circuitos electrónicos asociados.
3. **El electrón proyectil interacciona con los electrones orbitales** o con el campo nuclear de los átomos del blanco.
4. **Estas interacciones producen una conversión de la energía cinética de los electrones en energía térmica (calor)** y energía electromagnética en forma de radiación infrarroja (también calor) y **rayos X**.



Aproximadamente, el 99% de la energía cinética de los electrones proyectil se convierte en calor.

FIGURA 7-2

La mayoría de la energía cinética de los electrones proyectil se convierte en calor por las interacciones con los electrones de las capas externas de los átomos del blanco. Estas interacciones son, principalmente, excitaciones en lugar de ionizaciones.

Sólo alrededor del 1% de la energía cinética de los electrones proyectil se usa para la producción de radiación X. De esta manera, aun siendo tan complejos, los sistemas de imagen por rayos X son muy ineficientes.



La producción de calor en el ánodo aumenta directamente con el incremento de la corriente y Kvp del tubo de rayos X.

La eficiencia de la producción de rayos X es independiente de la corriente del tubo. Esta se mantiene constante cual sea el valor de mA.

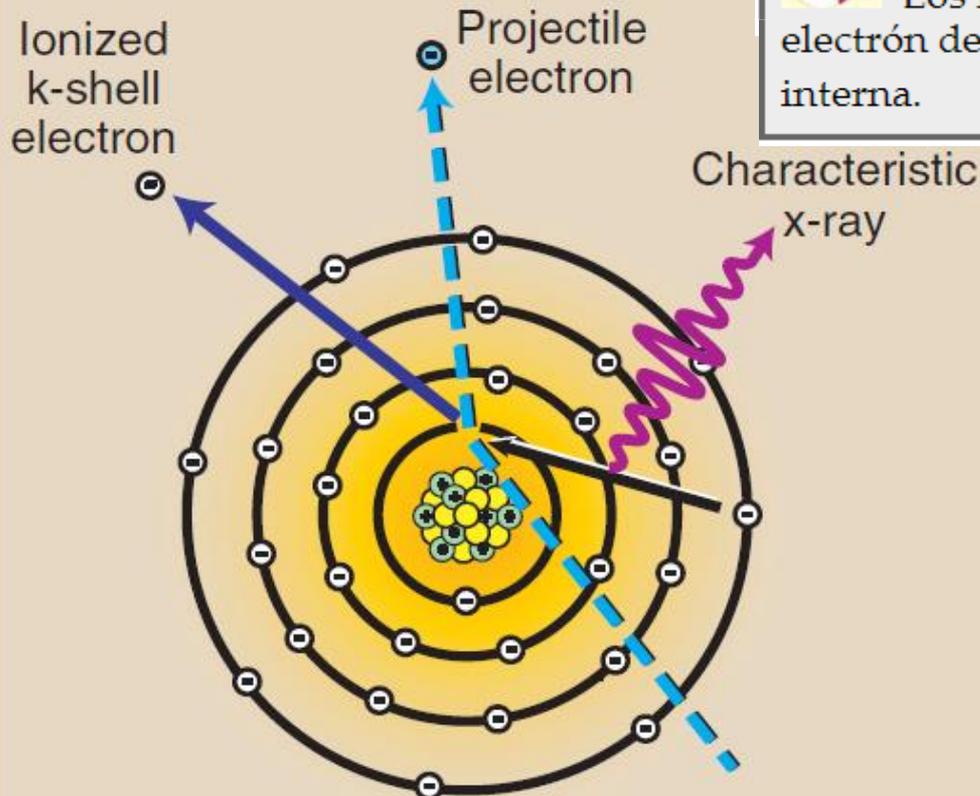
La eficiencia de producción de rayos X aumenta al incrementar el valor de kVp.

A 60 kVp sólo el 0,5% de la energía cinética se convierte en rayos X.

A 100 kVp se convierte en rayos X, aproximadamente, el 1%,
Y a 20 MV se convierte el 70%.



Es cuando el electrón proyectil interacciona con los electrones de las capas internas del átomo del blanco en vez de con los de las capas externas, se pueden producir **rayos X característicos**.

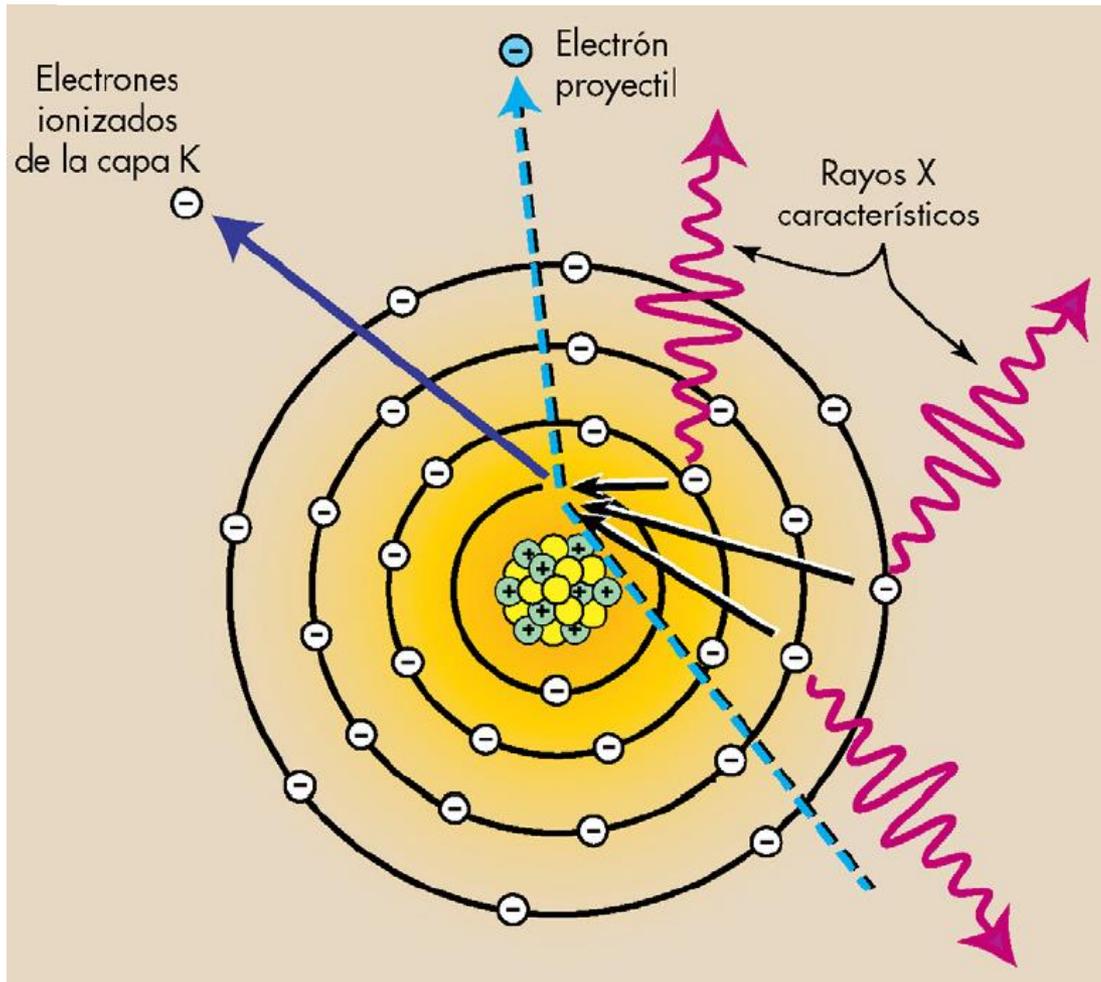


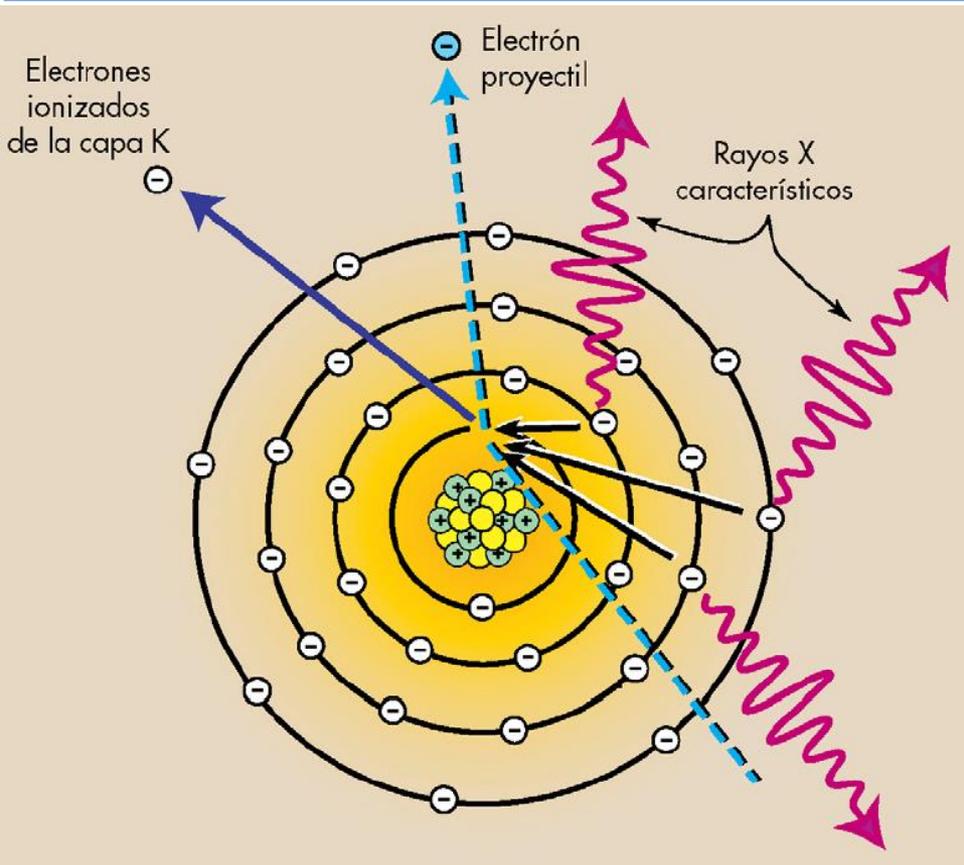
Los rayos X característicos son emitidos cuando un electrón de una capa externa ocupa un hueco de una capa interna.

RADIACIÓN CARACTERÍSTICA



FIGURA 8-3 Los rayos X característicos se producen tras la ionización de un electrón de la capa K. Cuando un electrón de la capa externa ocupa la vacante de la capa K se emite un rayo X.





De la misma manera, en un blanco de tungsteno se pueden producir rayos X característicos M, rayos X característicos N e incluso rayos X característicos O.

La figura 8-4 ilustra la configuración electrónica y la tabla de la siguiente diapositiva resume la producción de rayos X característicos en el tungsteno.

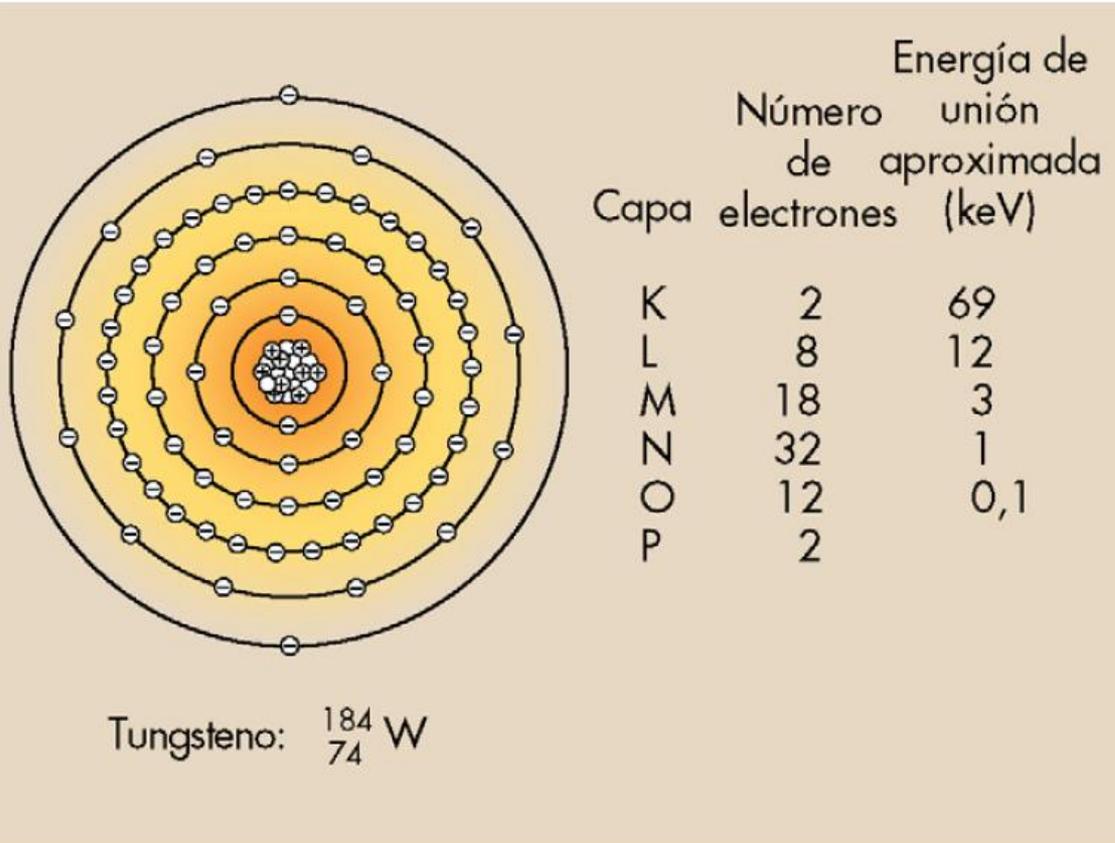


FIGURA 8-4 Configuración atómica y energías de enlace electrónico para el tungsteno.

Los rayos X resultantes de transiciones electrónicas hacia la capa L se denominan **rayos X, L** y tienen mucha menos energía que los **rayos X, K** porque la energía de enlace de un electrón de la capa L es mucho menor que la de un electrón de la capa K.

RADIACIÓN CARACTERÍSTICA

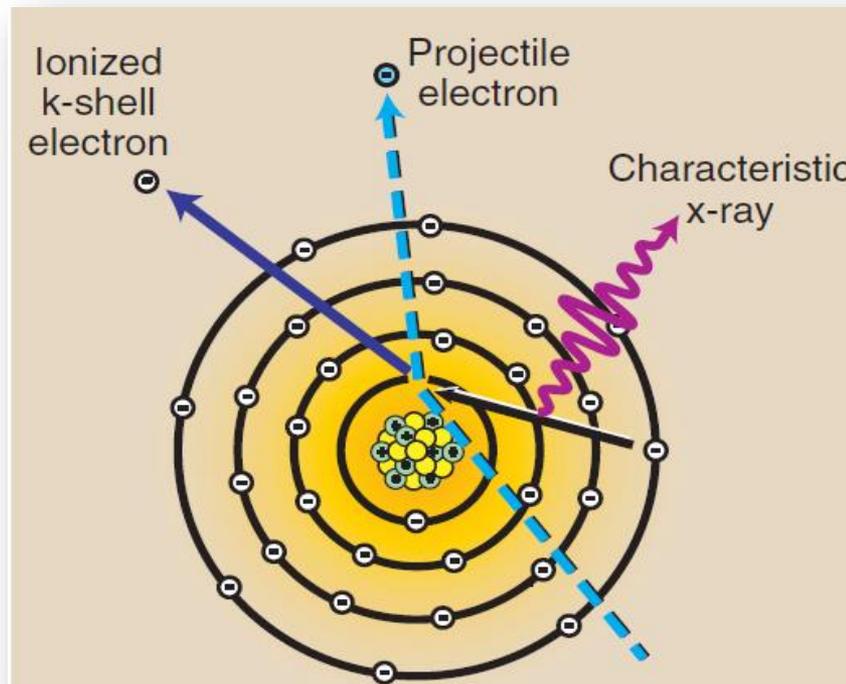


TABLA 8-1

Rayos X característicos del tungsteno y sus energías de enlace efectivas (keV)

TRANSICIÓN ELECTRÓNICA DESDE LA CAPA

Característica	Capa L	Capa M	Capa N	Capa O	Capa P	Energía efectiva de los rayos X
K	57,4	66,7	68,9	69,4	69,5	69
L		9,3	11,5	12,0	12,1	12
M			2,2	2,7	2,8	3
N				0,52	0,6	0,6
O					0,08	0,1





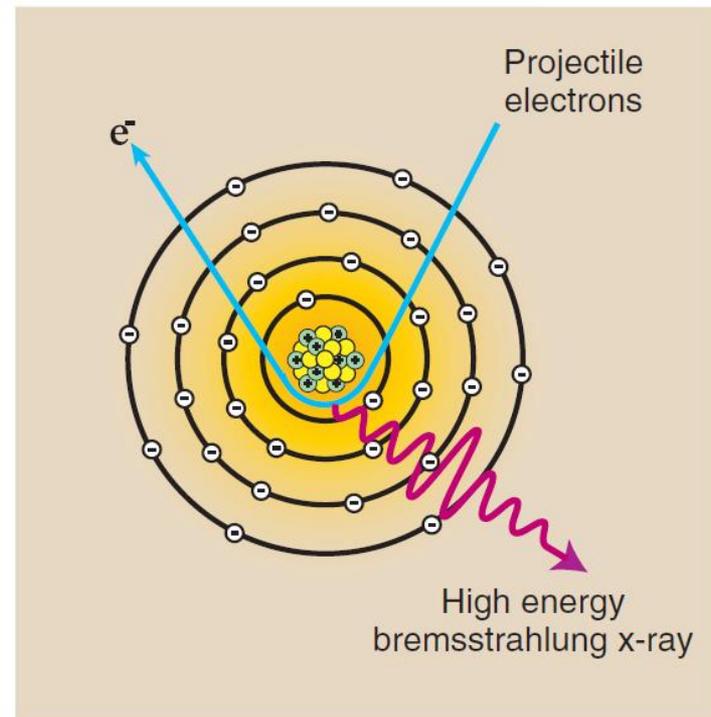
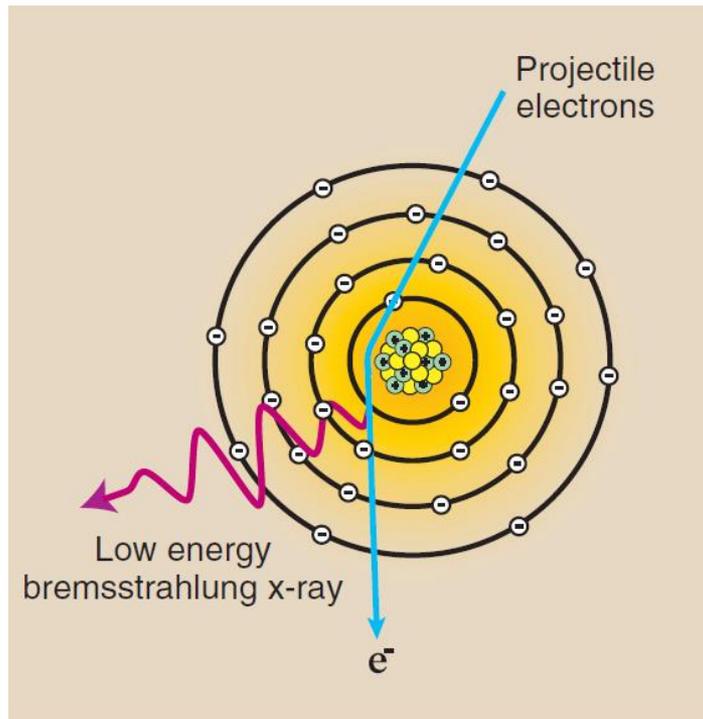
En este tipo de interacción de radiación , **la energía cinética del electrón proyectil también se convierte en energía electromagnética.**

Un electrón proyectil que **esquiva totalmente los electrones orbitales al pasar a través de un átomo del blanco puede acercarse lo suficiente al núcleo del átomo como para notar la influencia de su campo eléctrico** (fig. 7-5). Debido a que el electrón está cargado **negativamente** y el núcleo **positivamente**, existe una fuerza electrostática de atracción entre ellos.

RADIACIÓN BREMSSTRAHLUNG O RADIACIÓN DE FRENADO



Este campo es muy intenso, Cuando el electrón proyectil pasa cerca del núcleo, se frena y cambia de trayectoria, su energía cinética se reduce y modifica su desplazamiento. Esta pérdida de energía cinética reaparece en forma de un rayo X.



RADIACIÓN BREMSSTRAHLUNG O RADIACIÓN DE FRENADO



2 tipos de rayos X de bremsstrahlung:

baja energía se producen cuando un electrón proyectil se ve débilmente influenciado por el núcleo.

De energía máxima aparece cuando el electrón proyectil pierde toda su energía cinética y simplemente se aleja del núcleo.



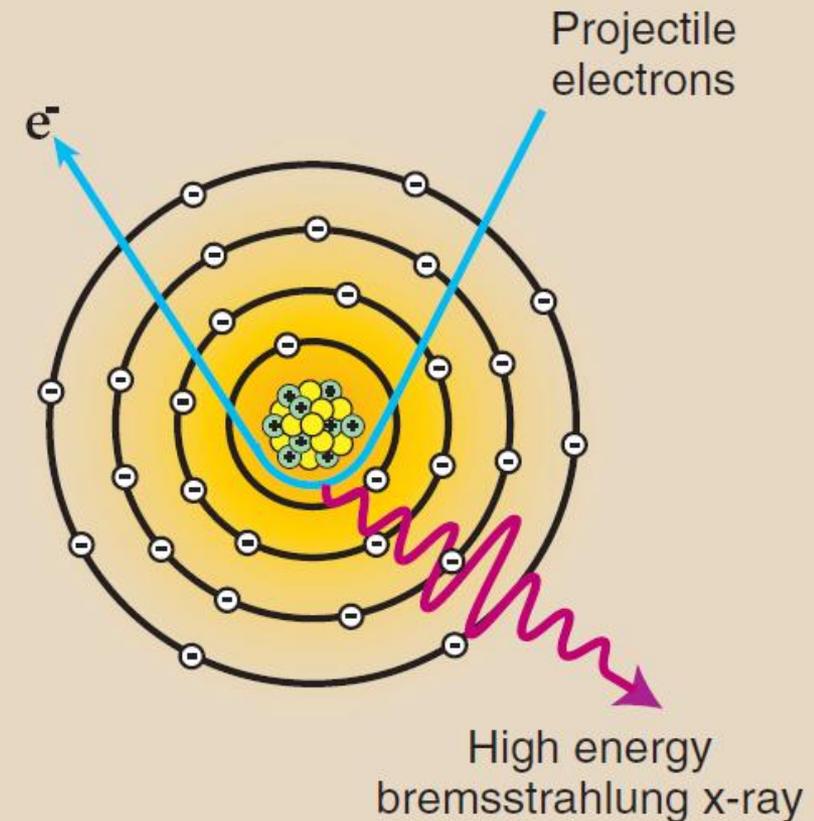
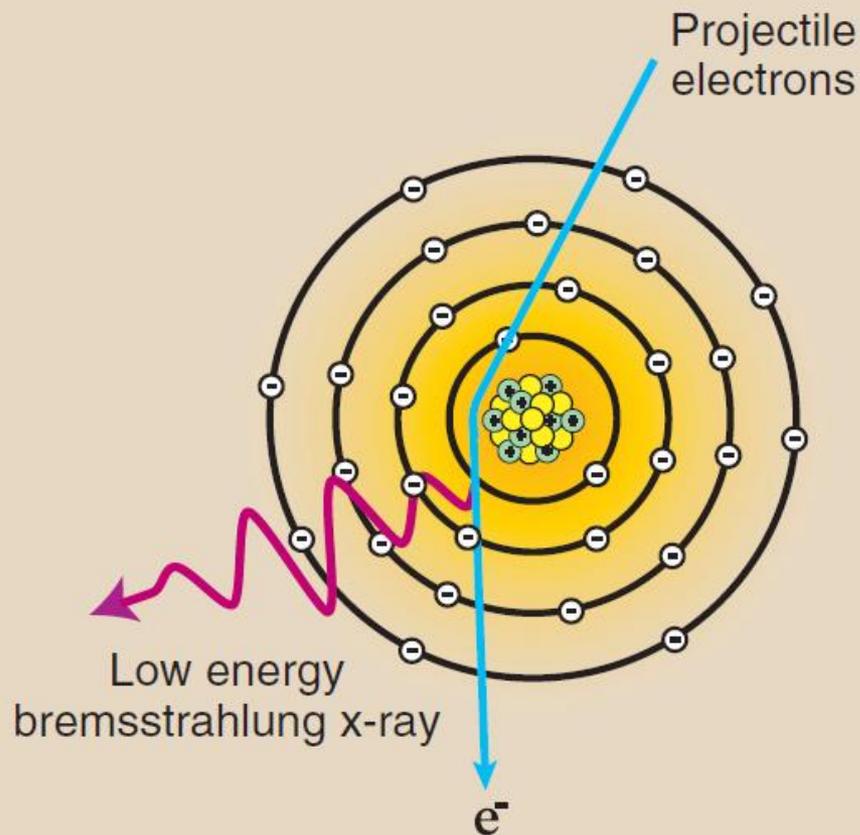
En el rango de diagnóstico, la mayor parte de los rayos X son rayos X de *bremsstrahlung*.

RADIACIÓN BREMSSTRAHLUNG O RADIACIÓN DE FRENADO



Los rayos X de *bremsstrahlung* se producen cuando un electrón proyectil es frenado por el campo eléctrico del núcleo de un átomo del blanco.

Bremsstrahlung: es una palabra alemana que significa «radiación de frenado».

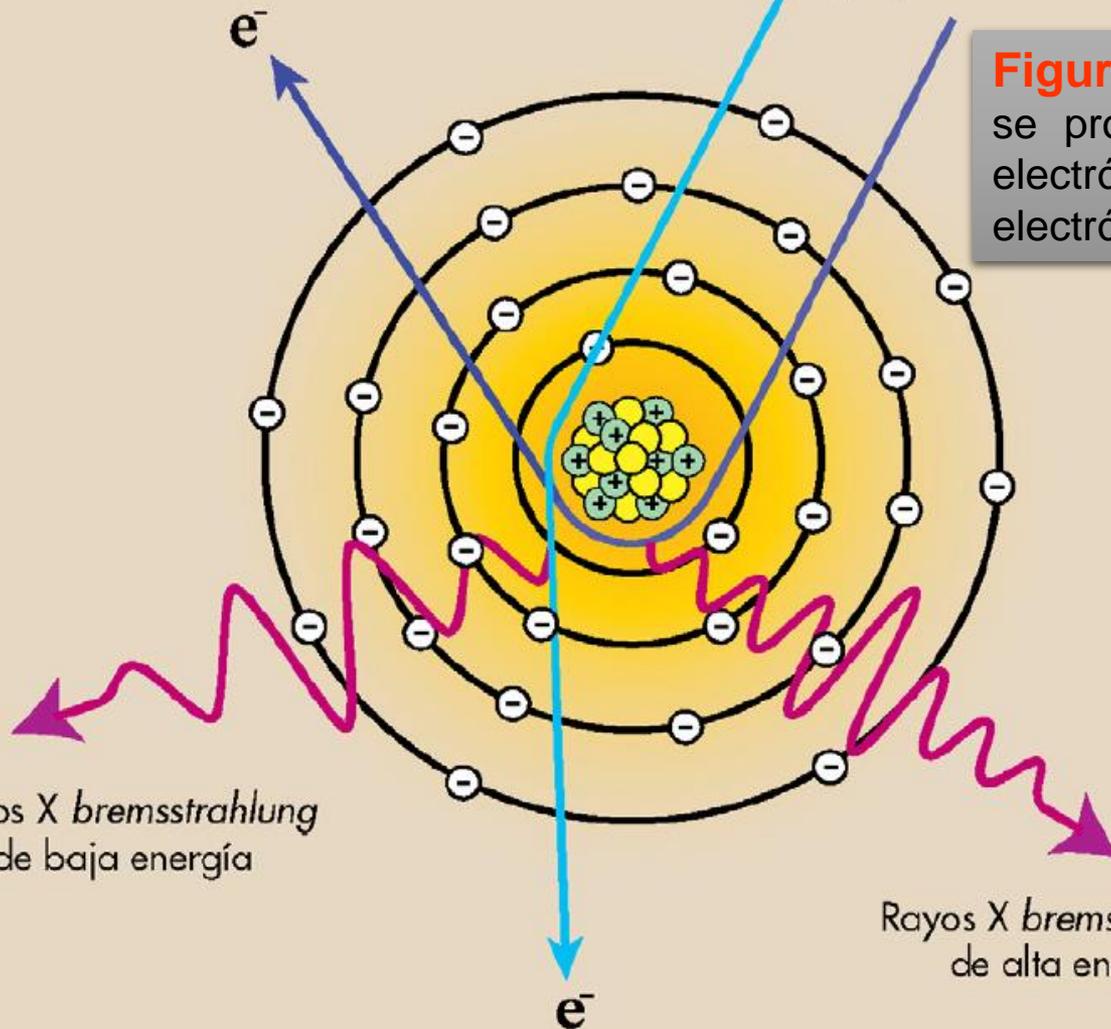


RADIACIÓN BREMSSTRAHLUNG O RADIACIÓN DE FRENADO



Electrones
proyectil

Figura 8-5 Los rayos X *bremsstrahlung* se producen por la interacción entre un electrón proyectil y un núcleo del blanco. El electrón se frena y su dirección cambia.



Rayos X *bremsstrahlung*
de baja energía

Rayos X *bremsstrahlung*
de alta energía

RADIACIÓN BREMSSTRAHLUNG O RADIACIÓN DE FRENADO



En el rango de diagnóstico, la mayor parte de los rayos X son rayos X de *bremsstrahlung*.

Los rayos X característicos K requieren un potencial del tubo de rayos X de al menos 69 kVp. A 65 kVp, por ejemplo, no se producen rayos X característicos útiles y, en consecuencia, el haz de rayos X es todo *bremsstrahlung*.

A 100 kVp, aproximadamente el 15% del haz de rayos X es característico y el resto es *bremsstrahlung*.

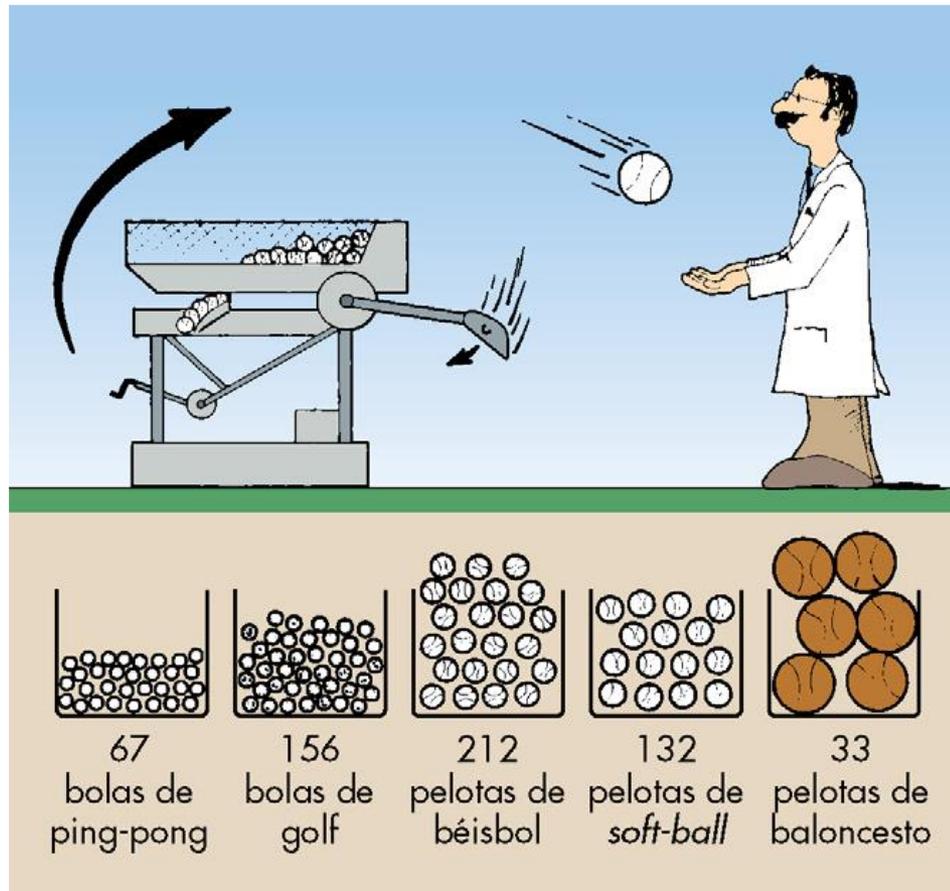


FIGURA 7-6 En un período dado, una máquina lanzadora automática lanza 600 pelotas, distribuidas como se muestra.

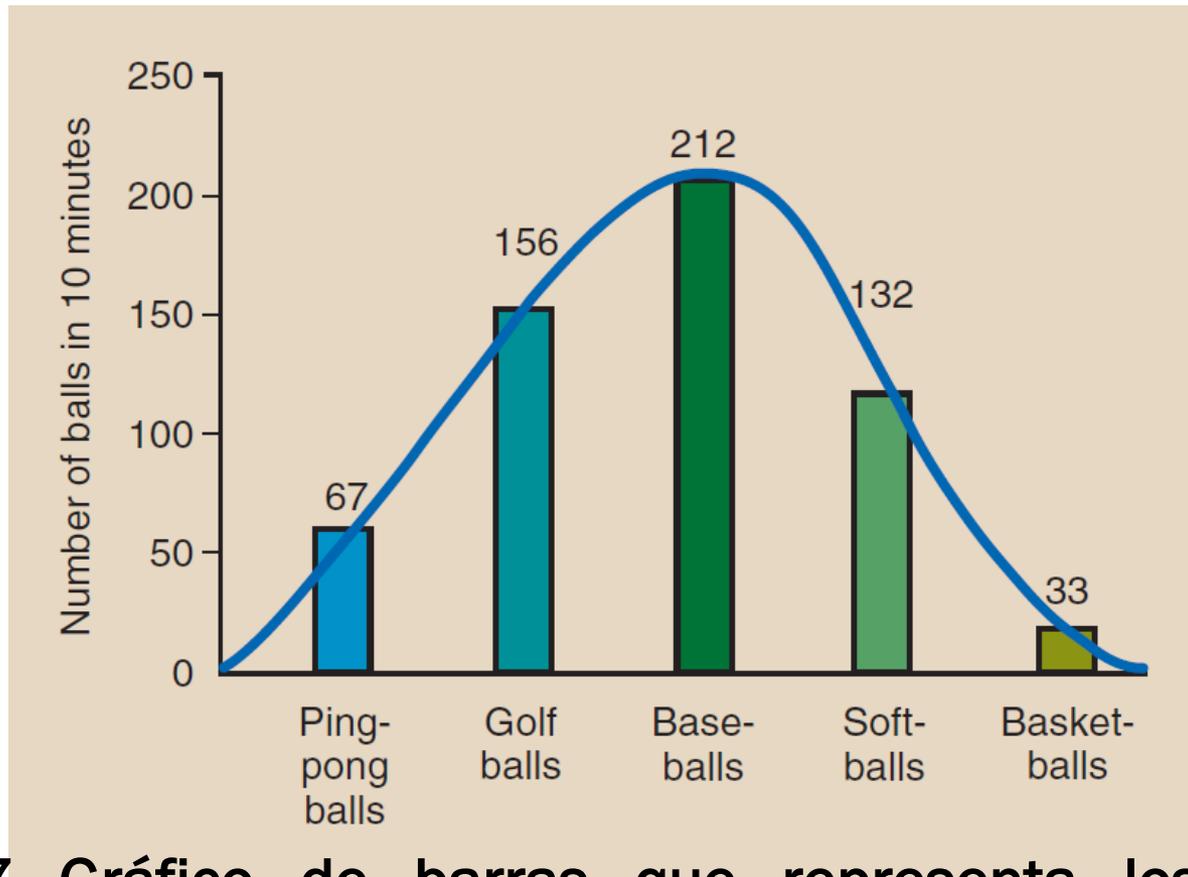
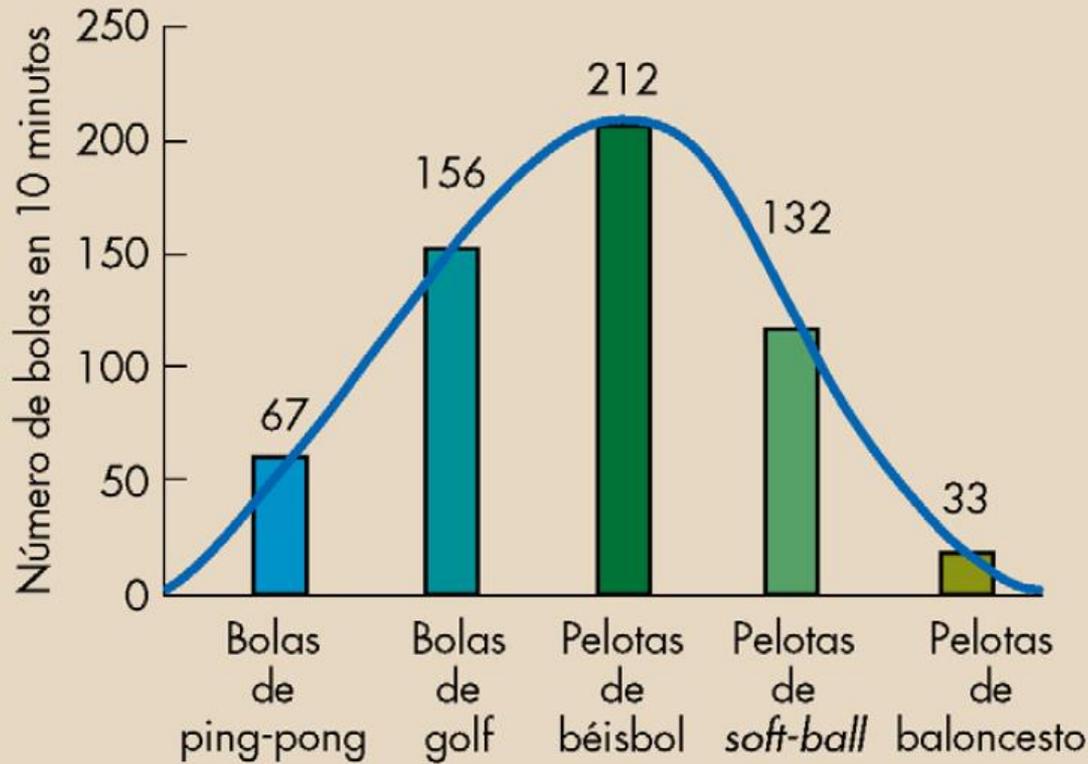


FIGURA 7-7 Gráfico de barras que representa los resultados obtenidos de la observación de las bolas y pelotas lanzadas por la máquina lanzadora automática de la figura 7-6 . Cuando se unen las alturas de cada barra, se crea un espectro de emisión suavizado.

ESPECTRO DE EMISIÓN DE RAYOS X



Un espectro discreto sólo contiene valores específicos.

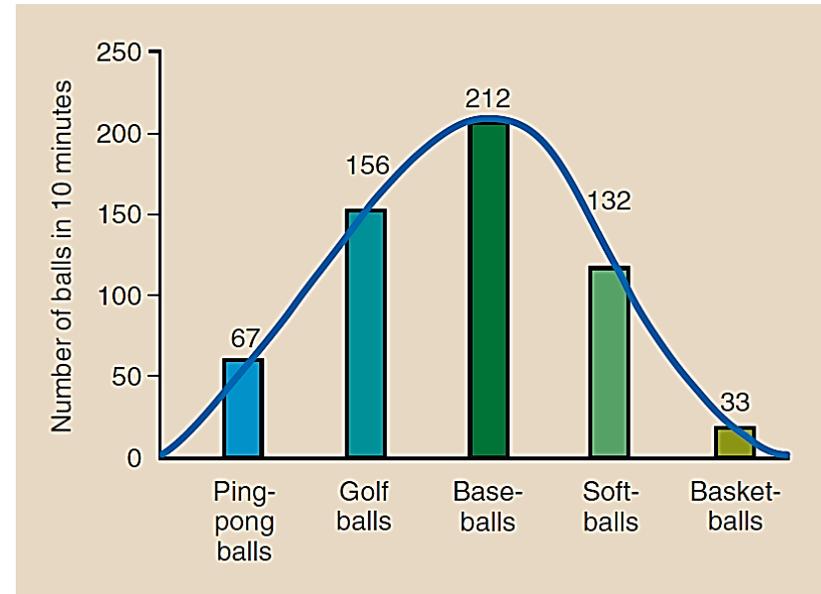


Un espectro continuo contiene todos los valores posibles.



Este tipo de relación es fundamental para describir la salida de radiación de un tubo de rayos X.

Si pudiéramos permanecer en medio de un haz útil de rayos X, atrapar cada rayo X individual y medir su energía, podríamos describir lo que se conoce como **espectro de emisión de rayos X**



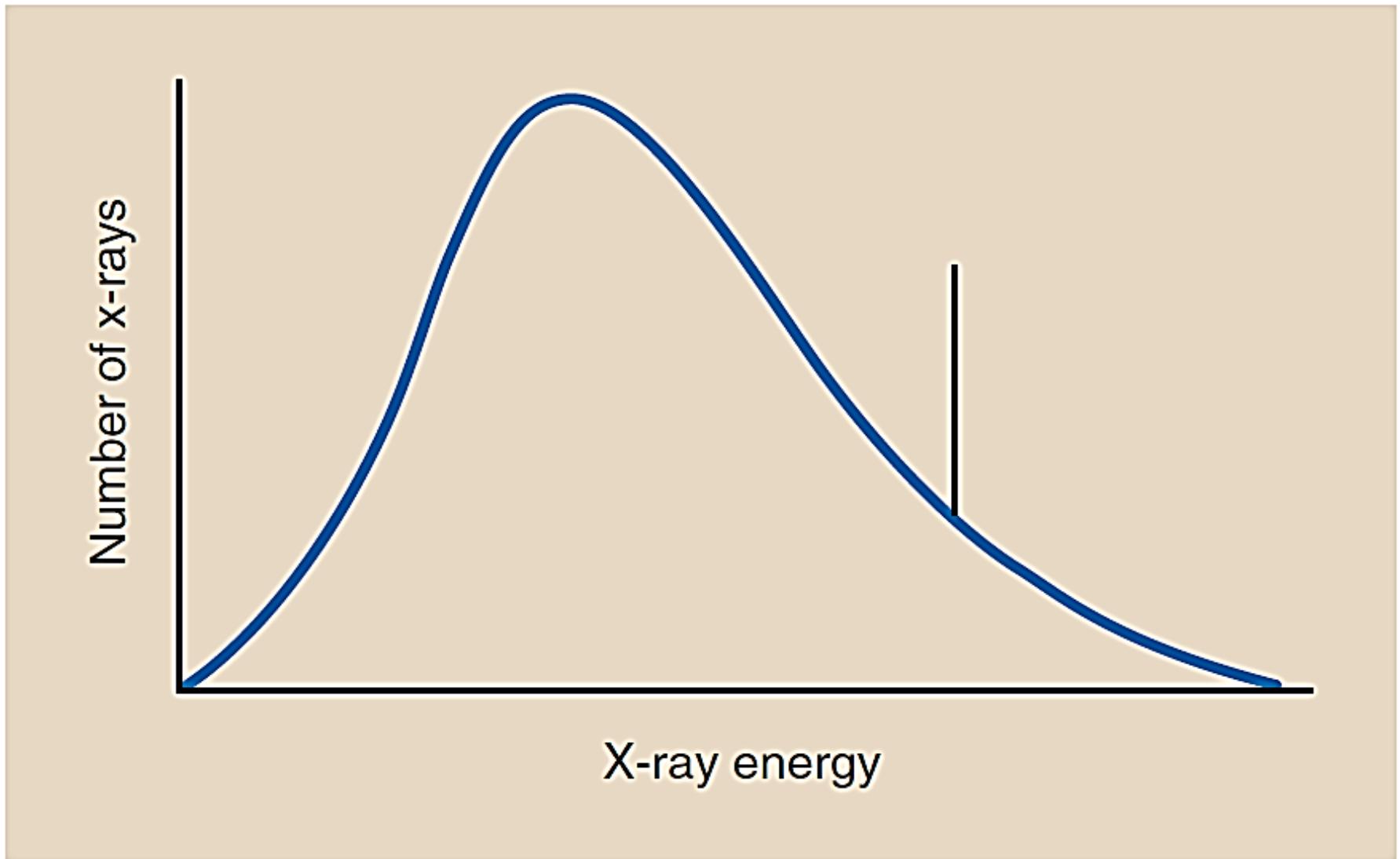


FIGURE 7-8 General form of an x-ray emission spectrum.

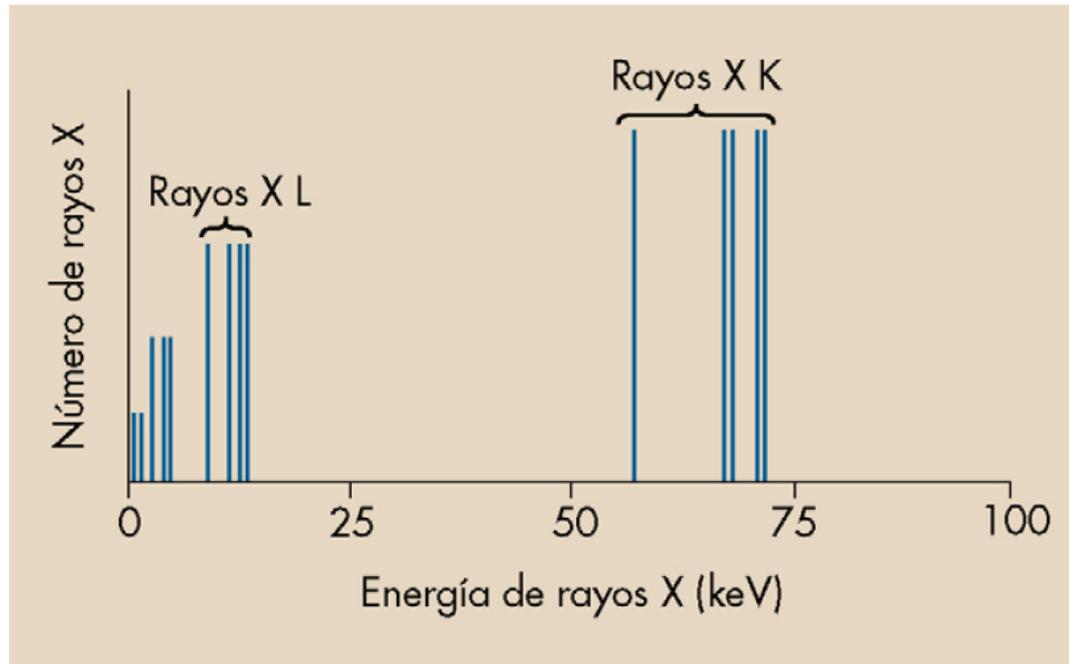


FIGURA 7-9 El espectro de emisión de rayos X característicos para el tungsteno contiene 15 energías de rayos X diferentes.



Los rayos X característicos tienen energías fijadas exactamente (discretas) y forman un espectro de emisión discreto.

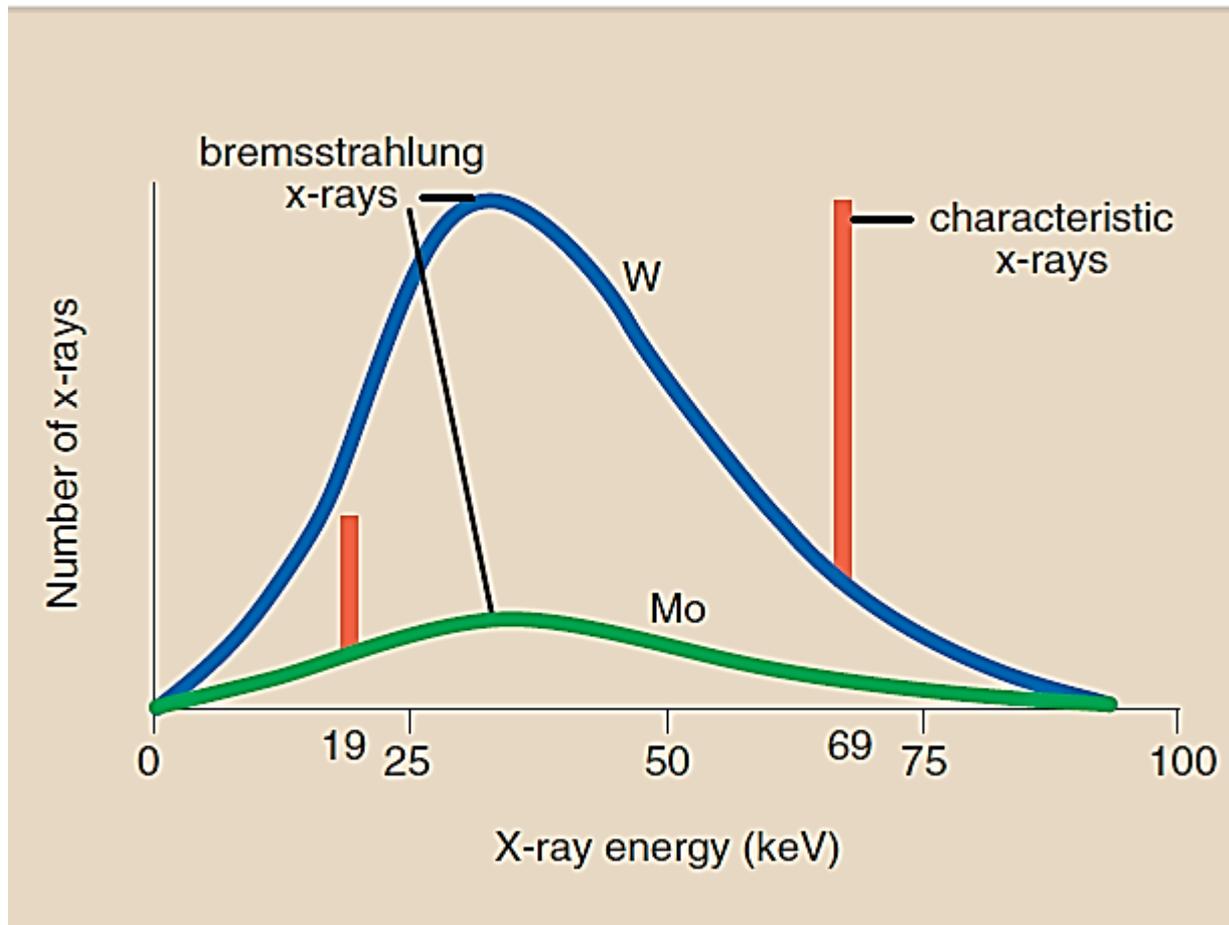
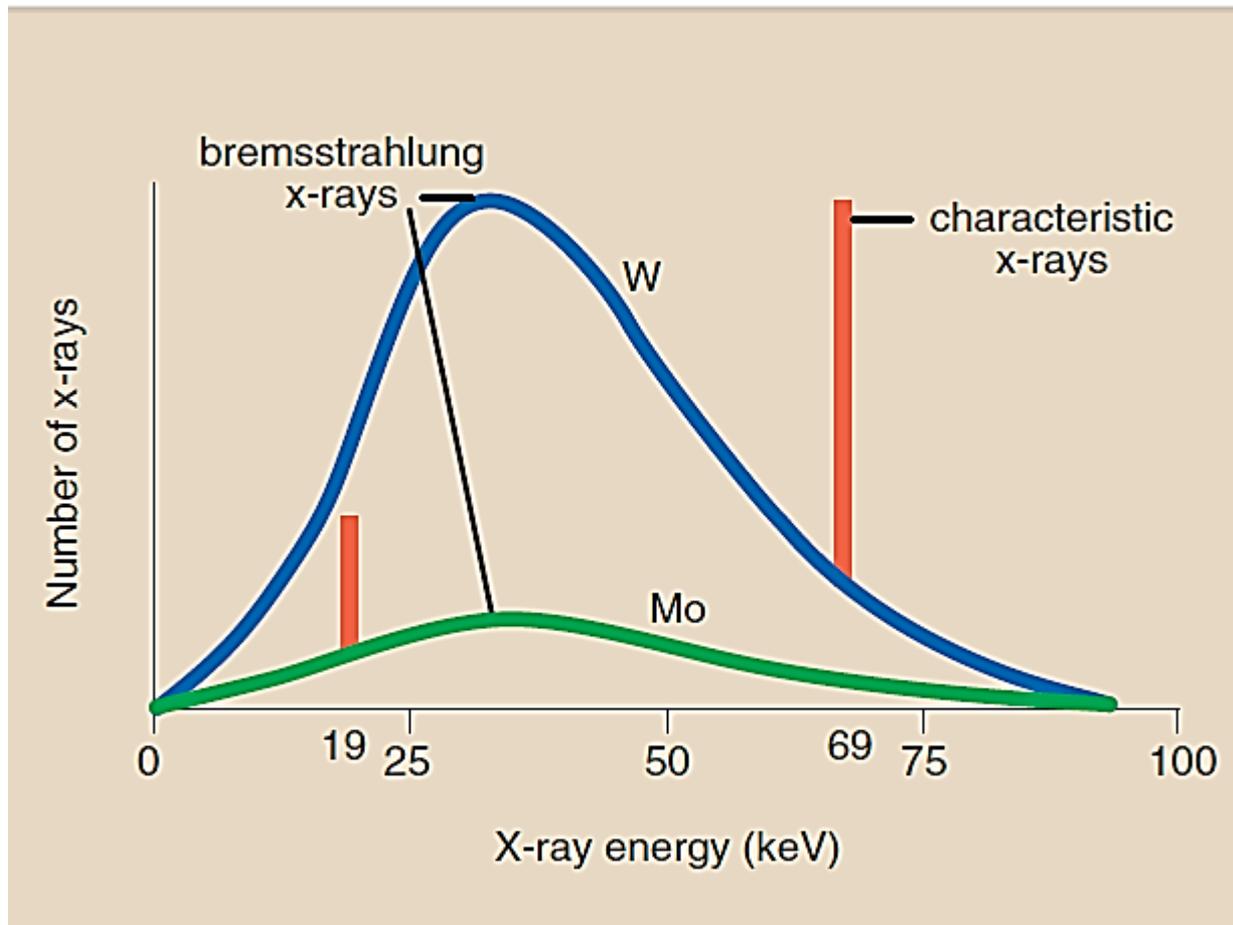
ESPECTRO DE EMISIÓN DE RAYOS X
BREMSSTRAHLUNG

FIGURA 7-10 El espectro de emisión de rayos X de bremsstrahlung se extiende desde cero hasta la energía máxima de los electrones proyectil, donde el mayor número de rayos X tiene, aproximadamente, una energía de un tercio de la energía máxima. El espectro de emisión de rayos X característicos está representado por una línea en 69 keV.

ESPECTRO DE EMISIÓN DE RAYOS X

BREMSSTRAHLUNG



Los rayos X de *bremsstrahlung* tienen un rango de energías y forman un espectro de emisión continuo.

ESPECTRO DE EMISIÓN DE RAYOS X

BREMSSTRAHLUNG



La energía máxima de los rayos X está asociada a la longitud de onda mínima de los rayos X ($\lambda_{\text{mín}}$).

la energía de los rayos X es igual al producto de su frecuencia (f) por la constante de Planck (h). La energía de los rayos X también es inversamente proporcional a su longitud de onda.

$$h = 4.15 \times 10^{-15}$$

**Tabla 7-2**

Factores que afectan al tamaño y a la posición relativa de los espectros de emisión de rayos X

Factor	Efecto
Corriente del tubo	Amplitud del espectro
Voltaje del tubo	Amplitud y posición
Filtración añadida	Amplitud, más efectivo con energías bajas
Material del blanco	Amplitud del espectro y posición de la línea espectral
Forma de onda del voltaje	Amplitud, más efectivo con energías altas



Efecto Del MA Y Los MAs Si se cambia la corriente de 200 a 400 mA mientras las demás condiciones permanecen constantes, circularán el doble de electrones del cátodo al ánodo y el valor de mAs se duplicará. Este cambio operativo producirá el doble de rayos X para cada energía. En otras palabras , **el espectro de emisión de rayos X cambiará de amplitud**, pero no de forma

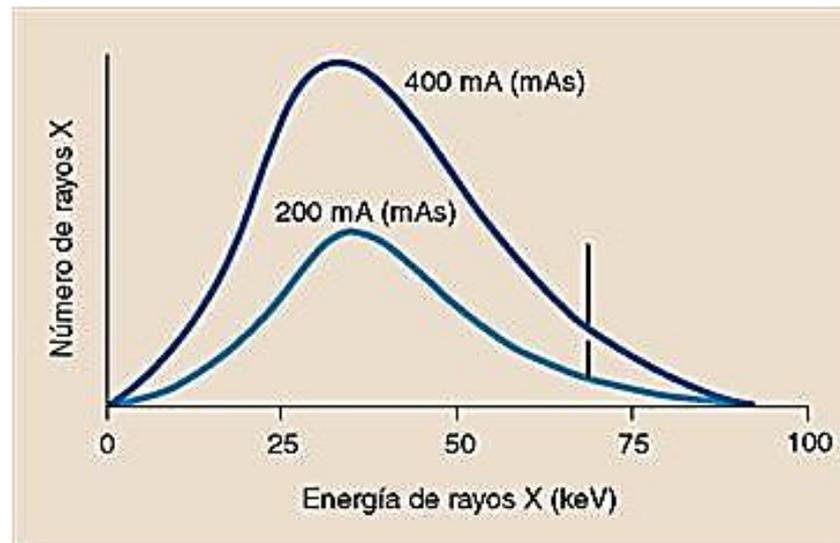


FIGURA 7-11 Un cambio en mA o mAs produce un cambio proporcional en la amplitud del espectro de emisión de rayos X a cualquier energía.



Un cambio en el valor de mA o mAs produce un cambio proporcional en la amplitud del espectro de emisión de rayos X para todas las energías.

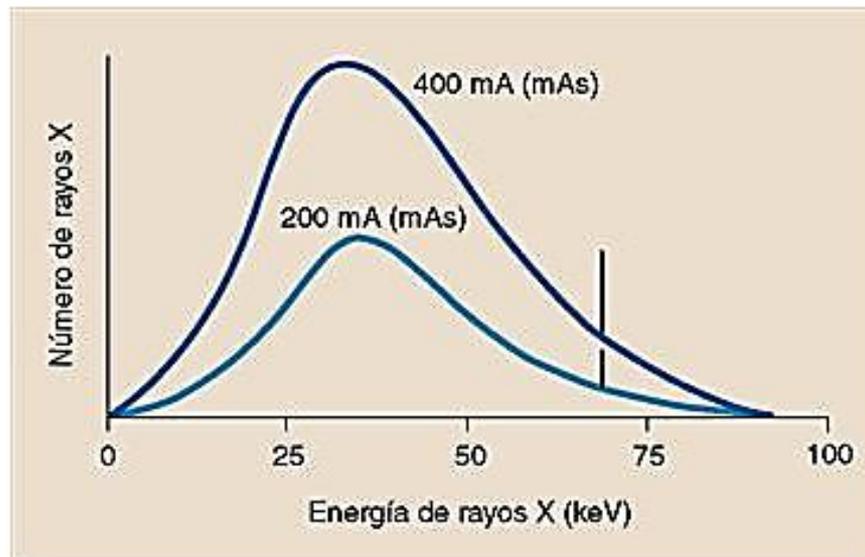


FIGURA 7-11 Un cambio en mA o mAs produce un cambio proporcional en la amplitud del espectro de emisión de rayos X a cualquier energía.



Los cuatro factores principales que influyen en la forma de un espectro de emisión de rayos X

1. **No todos los electrones proyectil acelerados desde el cátodo al ánodo tienen una energía cinética máxima.** Dependiendo del tipo de rectificación y de la generación de alto voltaje, muchos de estos electrones tendrán energías muy bajas cuando incidan sobre el blanco. Estos electrones solamente pueden producir calor y rayos X de baja energía.
1. **El blanco de un tubo de rayos X de diagnóstico es relativamente grueso.** En consecuencia, muchos de los rayos X de bremsstrahlung emitidos se producen por interacciones múltiples de los electrones proyectil, y para cada interacción sucesiva el electrón proyectil tiene menos energía.



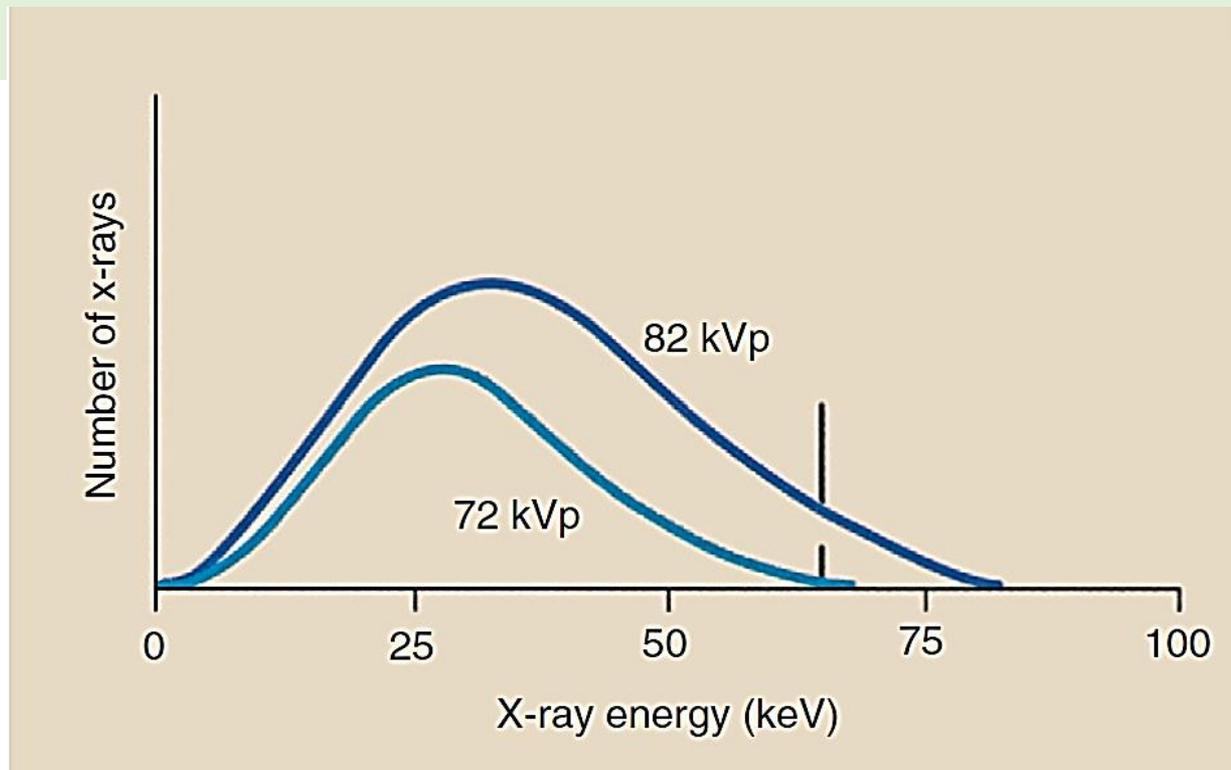
Los cuatro factores principales que influyen en la forma de un espectro de emisión de rayos X

3. Los rayos X de baja energía tienen más probabilidad de ser absorbidos por el blanco.
4. Siempre se añade filtración externa a la estructura del tubo de rayos X. Esta filtración añadida sirve selectivamente para eliminar los rayos X de baja energía del haz.



Efecto Del KVp

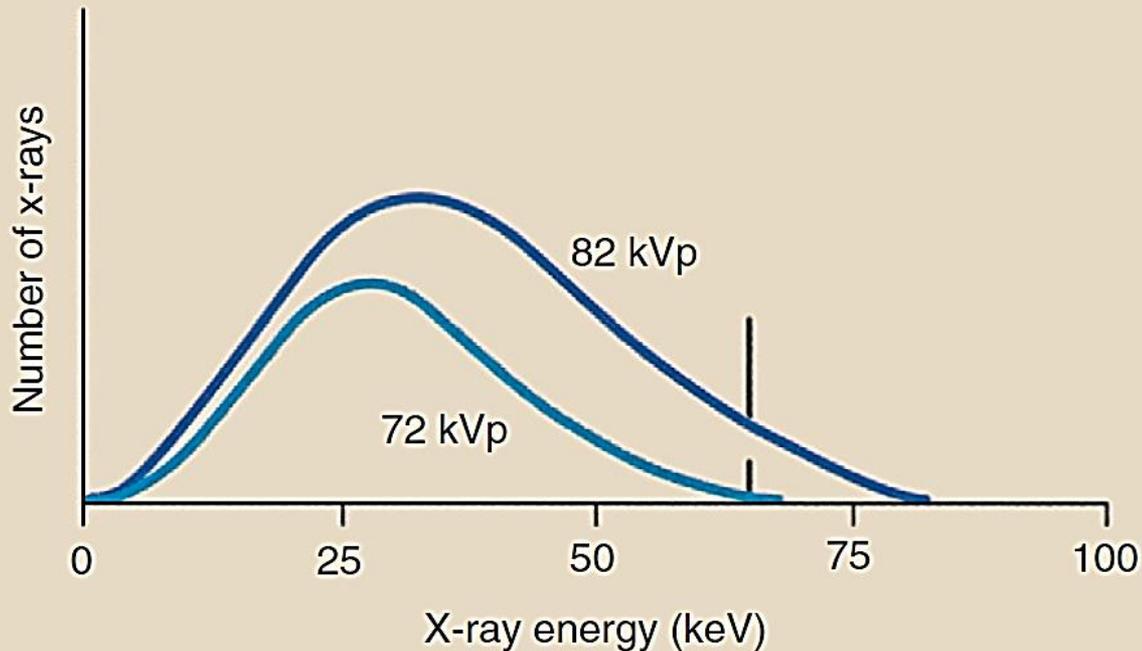
Cuando aumenta el valor de kVp, aumenta la amplitud y espectro de emisión de energía.



Un cambio en kVp produce un aumento en la amplitud del espectro de emisión para cualquier energía. aunque el aumento es mayor aún para altas energías que para bajas energías. Por consiguiente, **el espectro se desplaza hacia la derecha o hacia la zona de altas energías.**



Efecto Del KVp



Se emiten más rayos X a todas las energías durante el funcionamiento a 82 kVp que durante el de 72 kVp. Sin embargo, el aumento es relativamente mayor para los rayos X de alta energía que para los de baja energía.



En el rango diagnóstico, un aumento del 15% en kVp es equivalente a duplicar el valor de mAs.

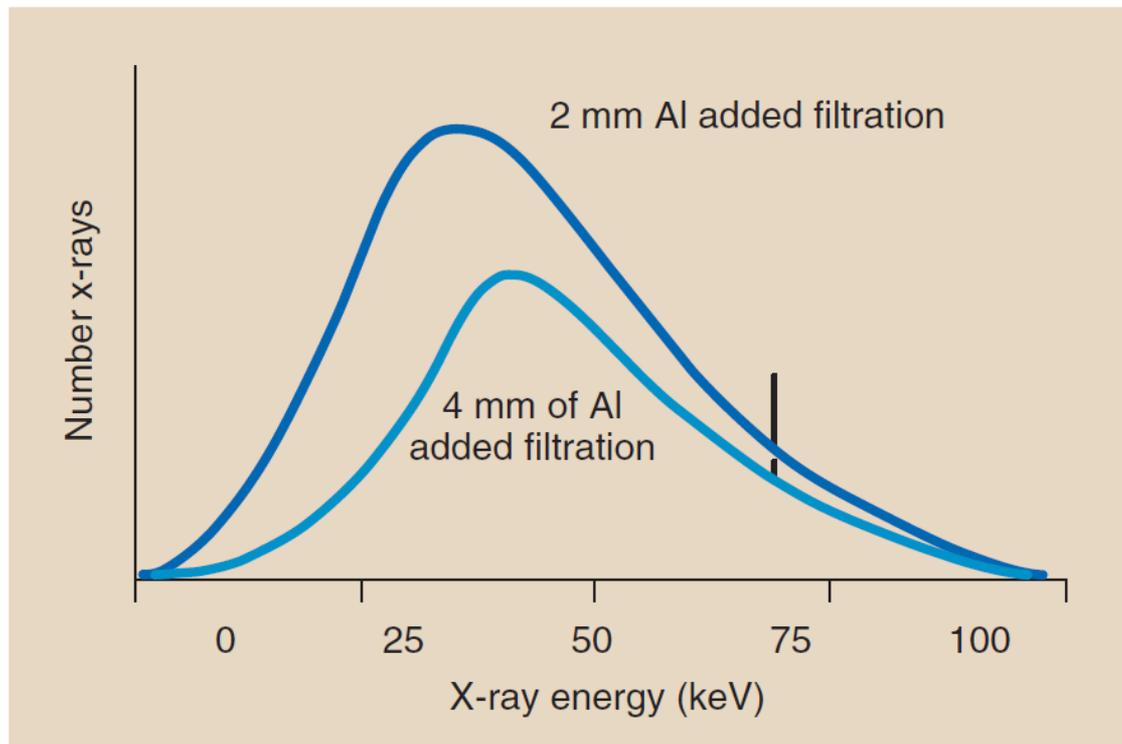
La regla determina que

- un aumento del **15% en kVp** es equivalente a **duplicar** el valor de **mAs** .
- Para **kVp bajos**, por ejemplo, de **50 a 60 kVp**, un aumento de **7 kVp** es equivalente, aproximadamente, a duplicar el valor de mAs.
- Para potenciales del tubo superiores a unos **100 kVp** puede ser necesario un cambio de **15 kVp**.



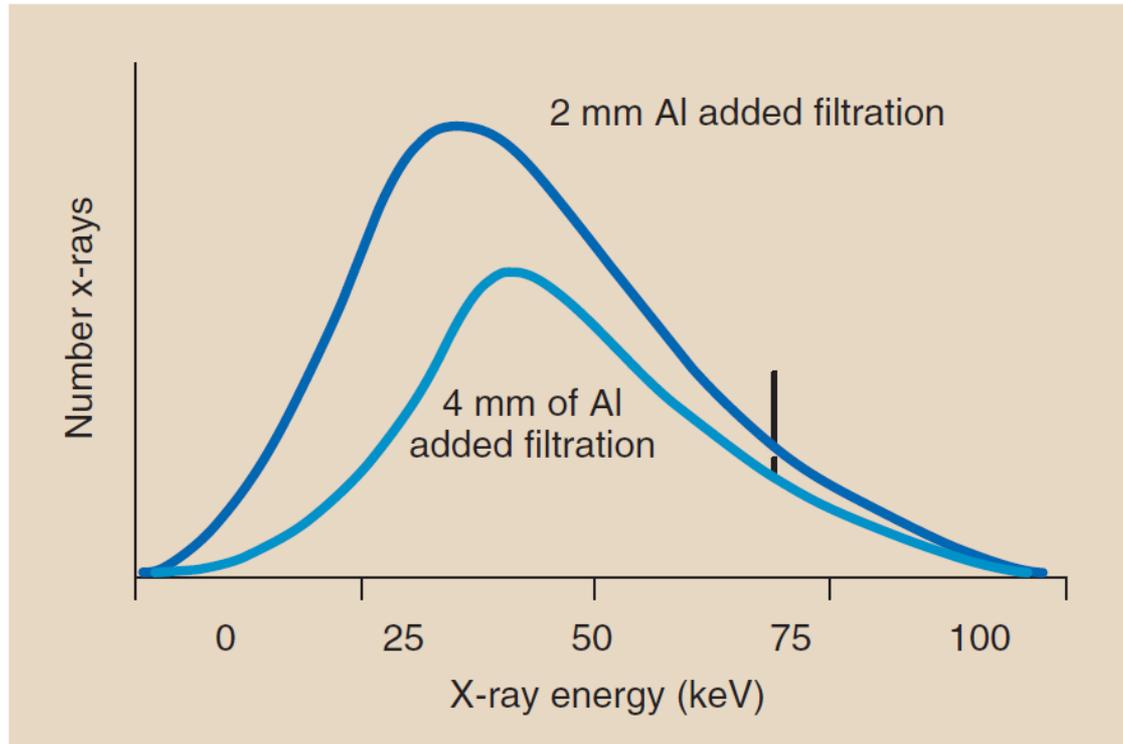
Efecto De La Filtración Añadida

La filtración añadida **absorbe con mayor eficacia los rayos X de baja energía que los rayos X de alta energía y, por consiguiente, el espectro de emisión de rayos X de bremsstrahlung se reduce más por la izquierda que por la derecha.**





Efecto De La Filtración Añadida



El resultado de la filtración añadida es un aumento en la energía media del haz de rayos X con una reducción simultánea en la cantidad de rayos X.



Efecto De La Filtración Añadida

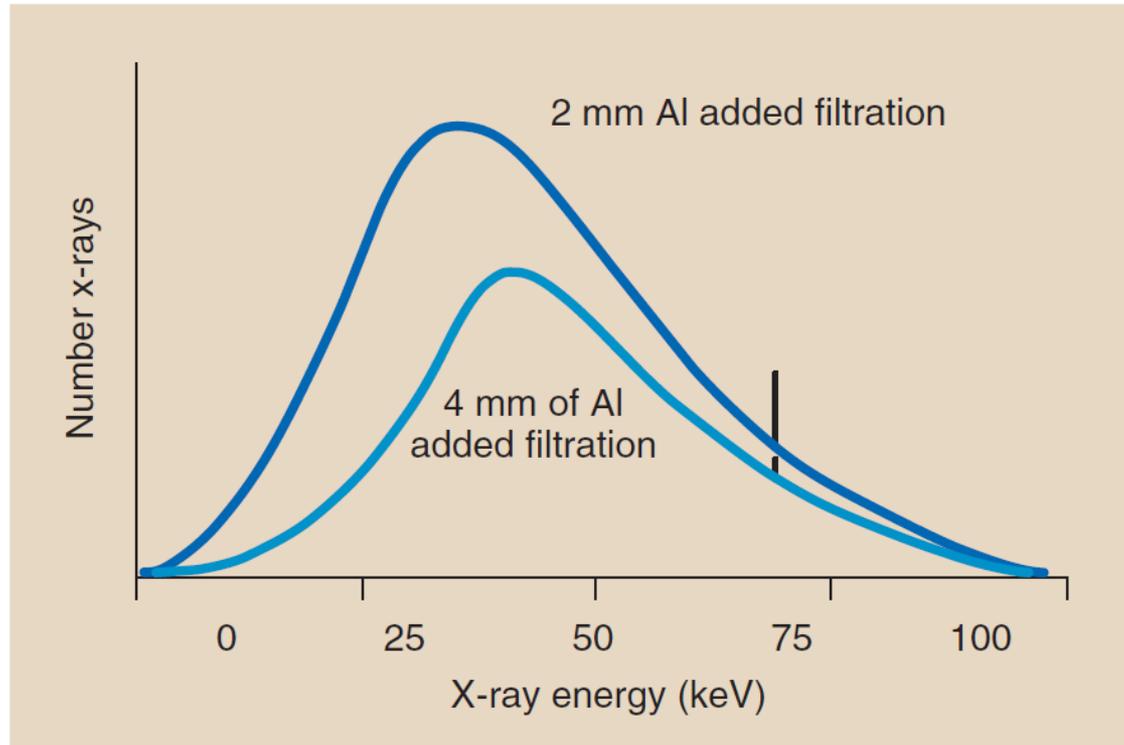
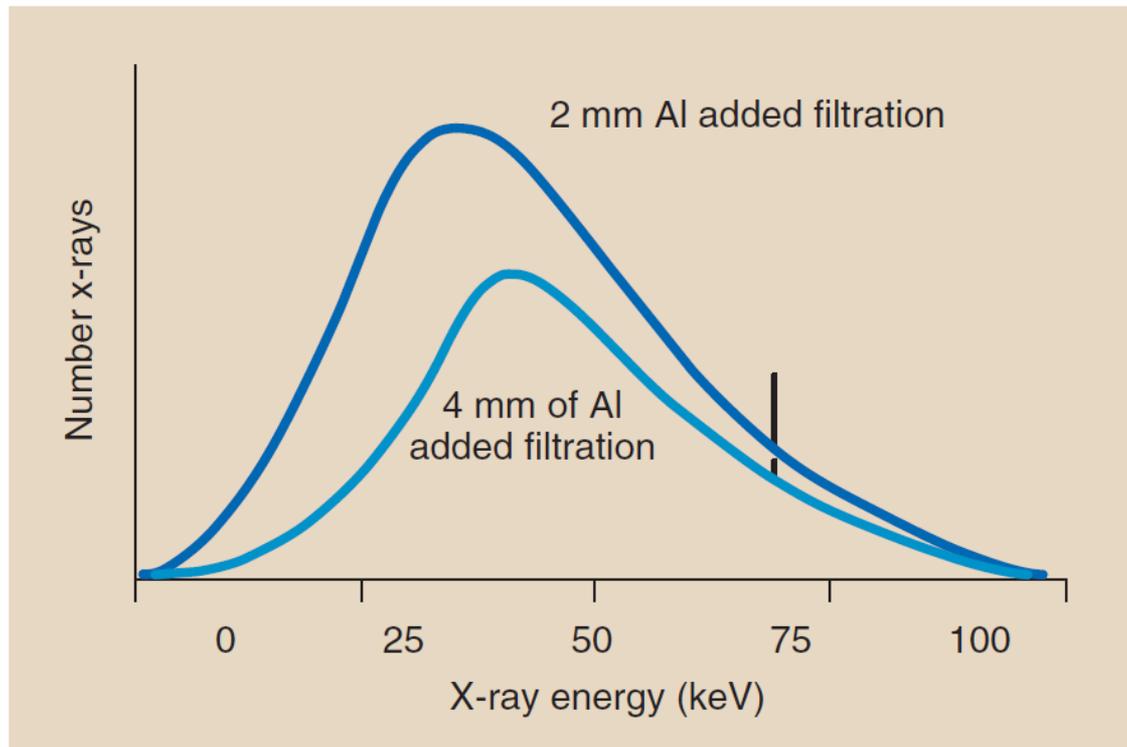


FIGURA 7-13 Al añadir filtración a un tubo de rayos X se produce una reducción en la intensidad de los rayos X pero un incremento de la energía efectiva. Los espectros de emisión aquí representados se obtienen al manejar los mismos valores de mA y kVp pero con filtraciones diferentes.



Efecto De La Filtración Añadida

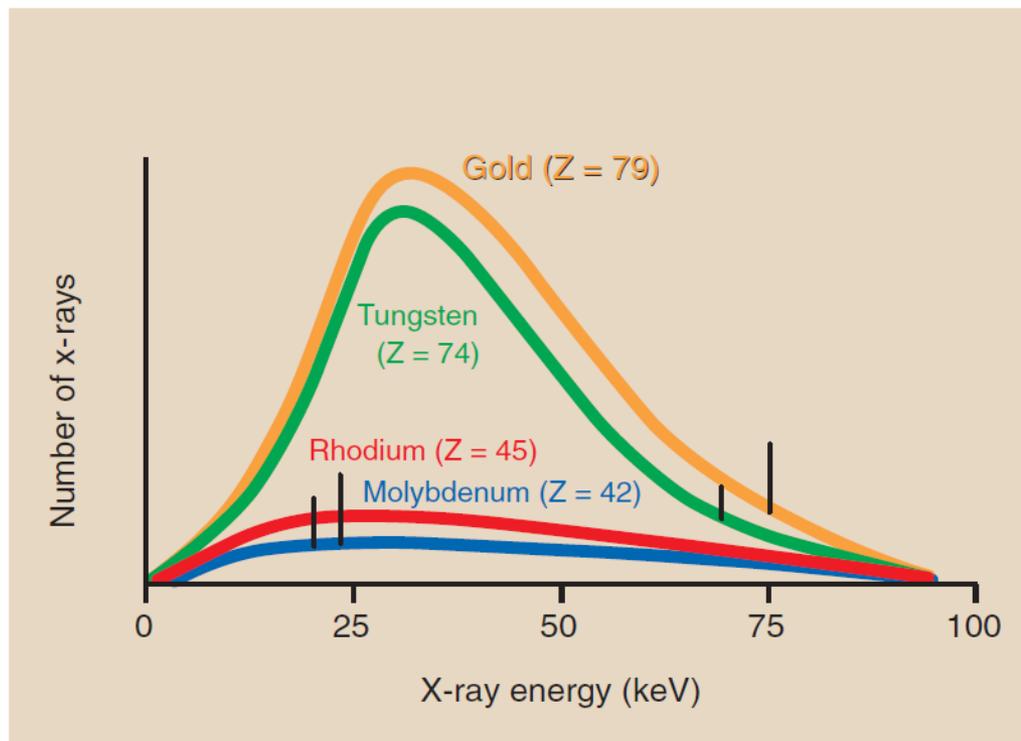


La filtración añadida a veces se denomina **endurecimiento** del haz de rayos X debido al aumento relativo de la energía media.



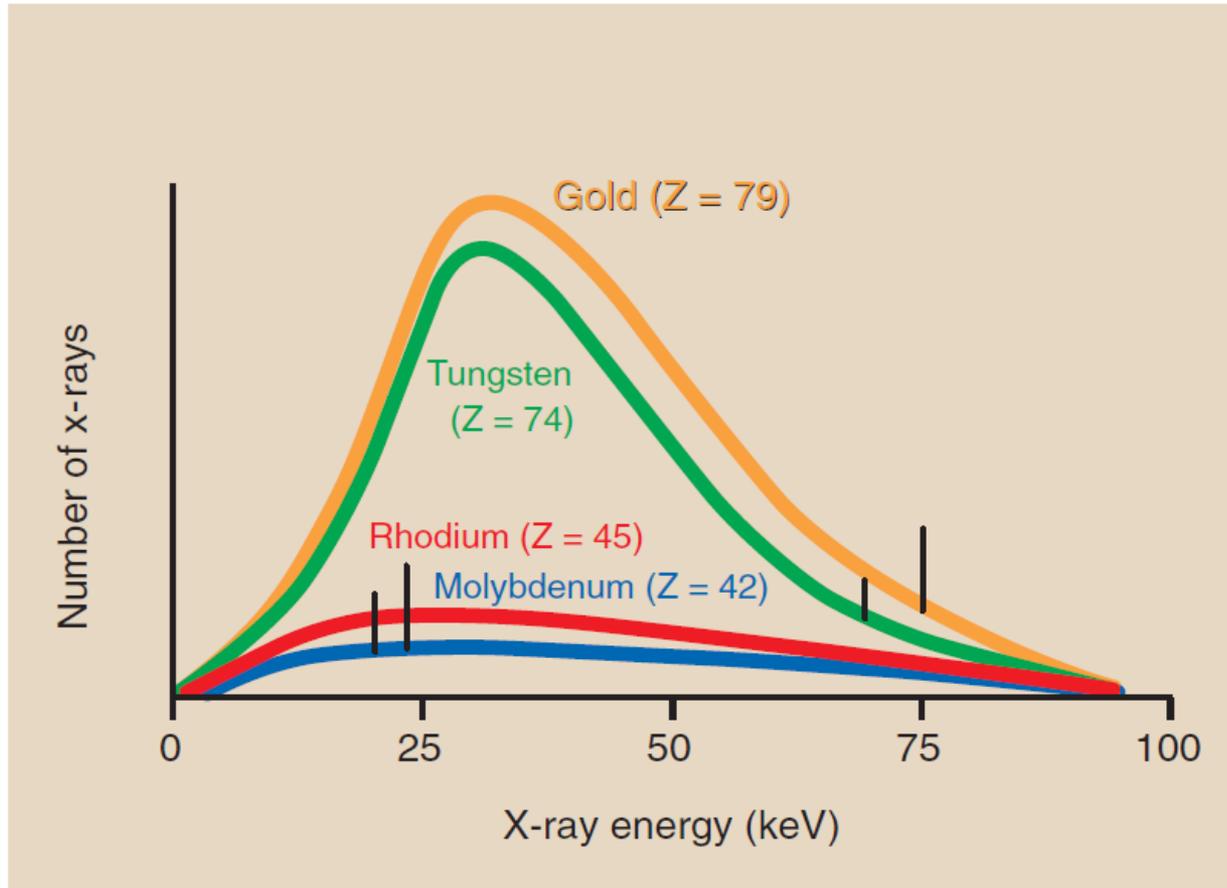
Efecto Del Material Del Blanco

Al aumentar el número atómico del material del blanco se incrementa la eficiencia de la producción de radiación bremsstrahlung y el número de rayos X de alta energía aumenta más que el de rayos X de baja energía.





Efecto Del Material Del Blanco



Al incrementar el número atómico del blanco se potencia la eficiencia de la producción de rayos X y la energía de los rayos X característicos y de *bremstrahlung*.



Efecto De La Forma De Onda Del Voltaje

rectificación de onda completa, trifásica/ 6 pulsos, trifásica/12 pulsos y alta frecuencia.



Debido a la disminución del rizado, el funcionamiento con alimentación trifásica o de alta frecuencia es equivalente a un aumento en kVp de alrededor del 12% o casi a duplicar el valor de mAs con respecto a la alimentación monofásica.



Efecto De La Forma De Onda Del Voltaje

