

Calibración de equipo de radiodiagnóstico no fluoroscópico

Por Salomón Rosenthal C.

Departamento de Ingeniería. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa. Apartado Postal 55-534, México 13, D.F.

RESUMEN

En este trabajo se presenta una serie de protocolos para la realización de pruebas de control de calidad en equipo de radiodiagnóstico. Para cada una de las pruebas se analizan los objetivos, se proporciona el procedimiento detallado para su realización, y se establecen los criterios de aceptación. Para que una unidad de rayos X se considere en óptimas condiciones de operación, deberá satisfacer cada una de estas pruebas. Los factores a medir son: calidad del haz, emisión de radiación, linealidad de los mA, tiempo de exposición, KVp, tamaño del punto focal, coincidencia del campo luminoso con el haz de rayos X, distancia del punto focal a la superficie de la mesa, y forma de onda de la radiación.

ABSTRACT

In this paper we present a series of test protocols for the quality control of radiodiagnostic equipment. For each of these tests we discuss the objectives, we present the detailed procedure to be followed and establish the quality control acceptance criteria. For an X-Ray unit to be considered in optimal operating conditions, it has to satisfy each one of the tests. The factors under control are the following: beam quality, radiation emission, mA linearity, exposure time, KVp, focal-spot size, light field-X ray beam coincidence, focal-spot-table-top distance and beam waveform.

Introducción

Los sistemas radiológicos que producen imágenes de estructuras anatómicas mediante el uso de rayos X son muy variados, no sólo en lo que respecta a generadores, tubos y transductores de imágenes, sino también en las diversas configuraciones en las que estos componentes son empleados para aplicaciones específicas.^{1,6} Por lo tanto, el diagnóstico obtenido por un médico radiólogo dependerá de la interacción de un gran número de componentes en una compleja cadena. El evaluar la efectividad de un sistema radiológico implica tanto la evaluación de los componentes del sistema como la evaluación de sus interacciones mutuas.

El desempeño de un sistema radiológico debería ser evaluado, idealmente, con base en la confiabilidad del diagnóstico hecho a partir del mismo. Sin embargo, esta tarea se dificulta debido a que el diagnóstico obtenido a partir de cualquier imagen radiológica depende de la experiencia del radiólogo y posee, por lo tanto, características subjetivas. Con base en lo anterior, podemos fijar como meta el obtener criterios de evaluación que tengan, al menos, cierta correlación con la efectividad clínica.

Objetivos

El propósito de este informe es proporcionar una serie de protocolos de pruebas no-invasivas que permitan al personal de mantenimiento (ingeniero biomédico) de un hospital iniciar un programa de control de calidad en radiodiagnóstico. Se incluye además una lista del equipo necesario, así como las curvas de calibración y las formas de control necesarias. El objetivo de estas pruebas es asegurar que el equipo de diagnóstico de rayos X opere dentro de los límites de trabajo especificados. A través de aquéllas se pretende alcanzar las siguientes metas:

- a) Mejorar la calidad del cuidado que se proporciona al paciente en los siguientes aspectos:
 - Mejoramiento de las condiciones de seguridad, mediante la prevención de fallas.
 - Reducción del tiempo de permanencia en el servicio de radiología.
 - Reducción de la dosis de radiación administrada.
- b) Reducir los costos de operación en los siguientes aspectos:
 - La carga de pacientes durante las horas pico.
 - El número de placas que deben ser repetidas.

TABLA I

PRODUCCION DE UNIDADES CALORIFICAS EN CADA UNA DE LAS PRUEBAS

Prueba No.	Cálculos	Disipación de calor
I	80 KVp x 200 mA @1/2 seg x 7	= 5 600
II	80 KVp x 200 mA @1/10 seg x 10	= 1 600
III	80 KVp x 1/10 seg x (50 + 100 + 200 + 300 + 450 + 600 + 750 + 900 + 1 000) mA	= 34 800
IV	80 KVp x 100 mA x tiempo (1/120 a 5 seg)	= 158 120
V	60 KVp x 150 mAs + 80 KVp x 90 mAs + 100 KVp x 20 mAs + 120 KVp x 6 mAs	= 18 920
VI	60 KVp x 20 mAs x 2	= 2 400
VII	60 KVp x 20 mAs	= 1 200
VIII	70 KVp x 40 mAs	= 2 800
IX	80 KVp x 160 mA x (2 x 1/15 + 2 x 1/2) seg	= 9 066
	Total:	= 284 906 HU (Heat Units)

c) Establecer estándares obligatorios y de consenso, los cuales deberán servir para evaluar las diferentes opciones de compra.

d) Garantizar la buena reputación, tanto institucional como profesional.

Equipo necesario

El equipo necesario para la realización de las pruebas aquí descritas es el siguiente:

a) Chasis Ardran-Crooks. Instrumento empleado para verificar que el kilovoltaje pico (KVp) seleccionado en la consola del generador y el aplicado en realidad a través de las terminales del tubo sean iguales, sin importar el nivel de miliamperaje (mA).

b) Cámara de ionización

c) Dosímetro digital para ser usado conjuntamente con la cámara de ionización (por lo tanto, ambos equipos deberán ser compatibles).

d) Osciloscopio. De preferencia, con memoria.

e) Dispositivo para verificar la alineación del haz de rayos X con el haz luminoso. Está constituido por una placa de material radiotransparente sobre la cual se han trazado escalas verticales y horizontales (20 X 20 cm) en material radiopaco.

f) Dispositivo para la medición del punto focal (patrón de barras) o cámara "pinhole".

g) Cámara Polaroid con adaptador para osciloscopio.

h) Soporte metálico, con pinzas ajustables.

i) Placas de aluminio puro (AL-1100) de varios espesores (.5 mm-3.5 mm).

j) Diodo sensible a la radiación (p-i-n).

k) Monitor de tiempo de exposición. De preferencia deberá ser digital, para facilitar su uso.

l) Película de varios tipos.

m) Densitómetro.

n) Dispositivo para medir la distancia del punto focal del tubo de rayos X a la superficie de la mesa. Este dispositivo está constituido por un objeto radiopaco, de dimensiones conocidas y orillas agudas, colocado sobre un objeto radiotransparente, de altura conocida.

o) Formas de papelería especiales, incluidas al final de este artículo (Apéndice II).

Capacidades caloríficas

Las nueve pruebas que se describen a continuación emplean las técnicas radiológicas que, según la experiencia del autor, producen los mejores resultados sin exceder la capacidad calorífica de la mayoría de las unidades. Estas técnicas pueden ser modificadas, en caso de que las características particulares de alguna unidad así lo exijan o para las pruebas que requieran el uso de película, si las densidades obtenidas no son las adecuadas.

En la Tabla I se presenta la información correspondiente a la producción de unidades caloríficas de cada una de las pruebas. Al probar un sistema particular por primera vez, es necesario revisar las tablas de disipación de calor del tubo para asegurarse que la capacidad calorífica del mismo es suficiente.

Protocolo de pruebas

Prueba No. 1. Calidad del haz

Objetivos: a) Verificar que la calidad del haz de rayos X se encuentre dentro de los límites que garanticen la seguridad del paciente, y b) Contro-

lar que la radiación posea una penetración adecuada.

Procedimiento: La calidad del haz se define en términos de la llamada capa del valor medio de atenuación (*Half value layer, HVL*). El *HVL* se determina encontrando el espesor que una capa de aluminio puro necesita para reducir la intensidad del haz a la mitad del valor inicial.

Para medir el *HVL*, coloque la cámara de ionización a 30" (75 cm) del punto focal y alinee la con el centro de dicho punto por medio del indicador luminoso de campo. Mediante la técnica indicada en el Apéndice I, haga una exposición sin usar el atenuador de aluminio. Con el soporte metálico haga exposiciones sucesivas, colocando capas de aluminio de espesor creciente a la mitad de la distancia entre el punto focal y la cámara de ionización. Use papel semilogarítmico y grafique las lecturas sucesivas de la cámara de ionización en función del espesor en mm de la capa de aluminio. A través de la interpolación obtenga, a partir de la gráfica anterior, el valor del espesor para el cual la intensidad se ha reducido a la mitad: éste es el valor de *HVL*.

Criterio de aceptación:² El valor obtenido *HVL* deberá ser mayor que 2.5 y menor que 3.5. Un valor de *HVL* por debajo de 2.5 indica un haz de baja calidad, y esto, a su vez, es sinónimo de la presencia de radiación de baja energía. Como es sabido, la radiación de baja energía se absorbe con mayor facilidad por los tejidos vivos, lo cual incrementa la probabilidad de ocasionar daños al paciente. Por el contrario, un valor de *HVL* por encima de 3.5 indicará un haz de calidad excesiva y, por lo tanto, de gran penetración. Esta propiedad del haz afectará los resultados obtenidos para una técnica dada,⁶ reduciendo el contraste de las imágenes en la película.

Prueba No. 2. Emisión de radiación

Objetivos: a) Estandarizar la exposición, y b) Asegurar que la salida del generador es reproducible para una técnica radiológica dada.

Procedimiento: Coloque la cámara de ionización a una distancia de 30" (75 cm) del punto focal. Use la técnica indicada en el Apéndice I y efectúe diez exposiciones sucesivas. Para cada exposición, anote la lectura del dosímetro. Para poder obtener el valor de la exposición en mR/mAs a partir de las lecturas del dosímetro, es necesario aplicar un factor de corrección que se obtiene a partir de la gráfica mostrada en la Figura 1 (refiérase a la Prueba No. 1). Calcule la media y la desviación estándar de las diez exposiciones.

Criterio de aceptación: La media calculada deberá ser de 10 mR/mAs \pm 20% para unidades de 3 fases, o de 6 mR/mAs \pm 30% para las de una fase. La desviación estándar en ambos casos no deberá exceder el 5% del valor de la media correspondiente.

Prueba No. 3. Linealidad de la relación intensidad-mAs

Objetivo: Comprobar que existe una relación lineal entre la intensidad del haz (mR) y los mAs aplicados al tubo a lo largo de todo el rango de valores de mAs.^{1,3}

Procedimiento: Esta prueba se efectúa variando el valor de la corriente de tubo (mA) a lo largo del rango de valores posibles, y manteniendo constantes el potencial del tubo y el tiempo de exposición. Para tal efecto, coloque la cámara de ionización a 30" (75 cm) del punto focal. Con la técnica indicada en el Apéndice I obtenga dos lecturas de intensidad para cada valor posible de los mA. Tome nota de estas lecturas y calcule el valor corregido de mR/mAs, tal como fue hecho en la Prueba No. 1. Calcule la media de estos valores. Haga en papel milimétrico una gráfica de los mR/mAs contra el valor correspondiente de mA. Obtenga la máxima desviación porcentual de la media calculada.

Criterio de aceptación: La desviación porcentual máxima obtenida deberá ser menor o igual al 10 por ciento.

Prueba No. 4. Exactitud del tiempo de exposición

Objetivo: Determinar la exactitud del cronómetro (timer) de la unidad de rayos X. El tiempo de

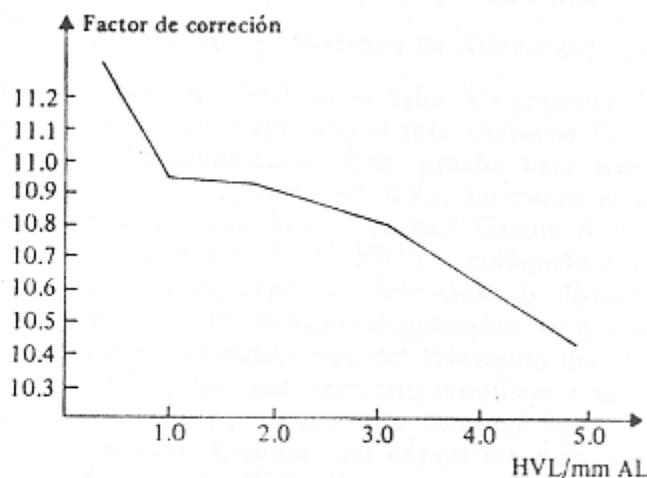


Figura 1. Gráfica para obtener el factor de corrección de la exposición (en mR/mAs) en función del espesor de capa media (tomada de *Medical Physics*, Volumen 5, Número 2, marzo-abril, 1976).

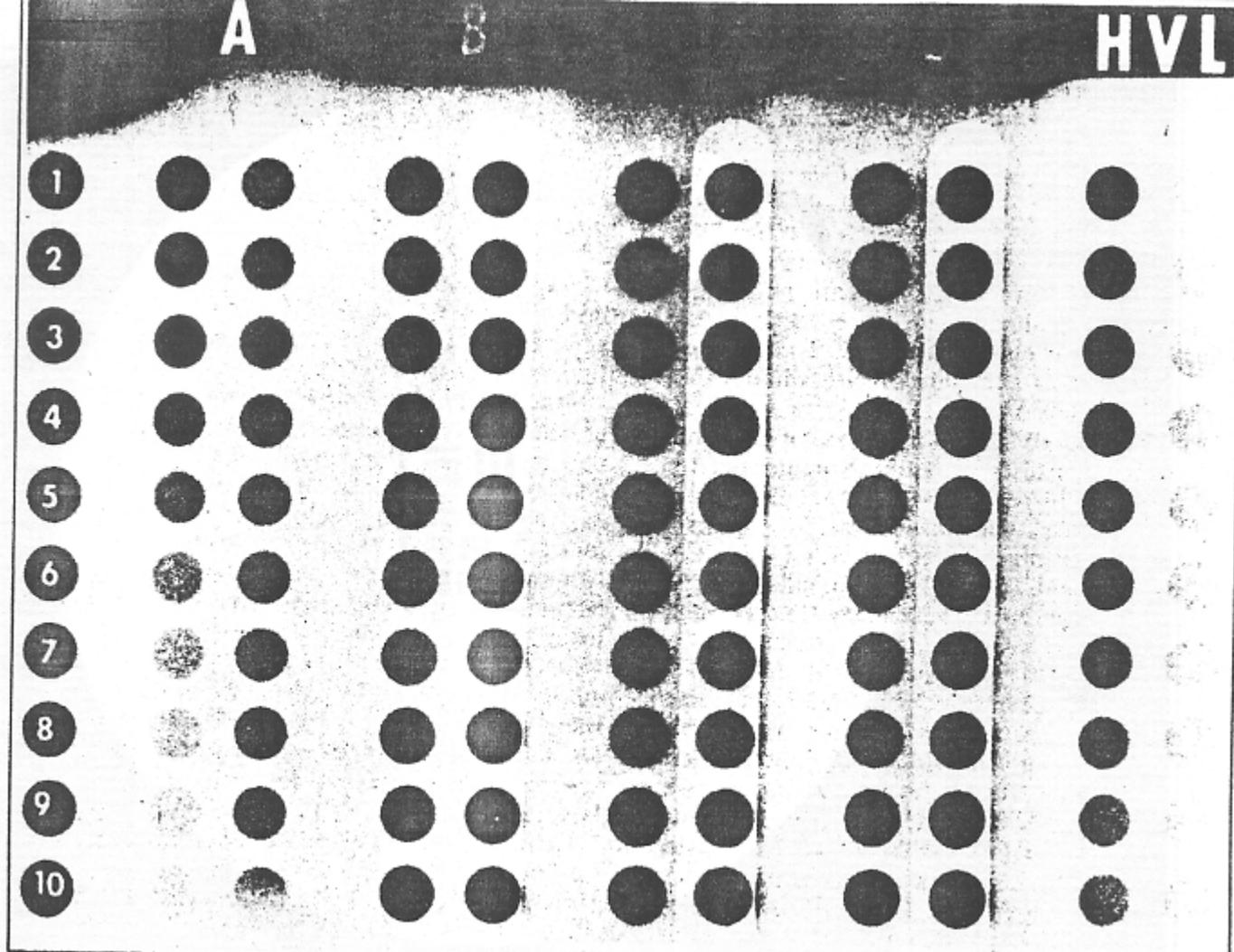


Figura 2. Radiografía obtenida a partir de un chasis de Ardan-Crooks. Las columnas A, B C y D corresponde a 60, 80, 100 y 120 KVp, respectivamente. La columna correspondiente a HVL no fue utilizada. Se puede apreciar, por ejemplo, que se tiene coincidencia de densidades entre el cuarto y quinto escalón de la columna correspondiente a 60 KVp.

exposición afecta directamente el valor de los mAs y, por consiguiente, la cantidad de radiación emitida. Esta prueba, en combinación con la anterior, garantizará que cualquier combinación de corriente de tubo y tiempo de exposición producirá una cantidad de radiación predecible.

Procedimiento: Coloque el detector digital de tiempo de exposición en el centro de campo de rayos X a una distancia de 30" (75 cm) del generador, si éste es de una fase, o a 40" (100 cm) si éste es de 3 fases. Encienda el detector digital de tiempo de exposición. Seleccione en el generador el tiempo de exposición deseado. Con la técnica indicada en el Apéndice I haga una exposición y anote la lectura obtenida en el detector digital (el número de pulsos para unidades de una fase o el número de segundos para las de 3 fases). Esta lectura deberá redondearse a 3 dígitos significativos. Tome lecturas para todo el

rango de valores de tiempos de exposición. Calcule el error porcentual para cada exposición.

Criterio de aceptación: El error porcentual máximo no deberá ser mayor de $\pm 5\%$.^{1,2}

Prueba No. 5. Medición de Kilovoltaje pico^{1,4}

Objetivo: Verificar el valor del potencial eléctrico pico (KVp) aplicado al tubo de rayos X.

Procedimiento: Esta prueba hace uso de un chasis de prueba de KVp, tal como el que fue descrito por Ardan-Crooks.⁴ Cargue el chasis con película (8" X 10" XRP) y colóquelo dentro del campo de rayos X. Seleccione la distancia y el valor de los mAs en el generador, de acuerdo con las recomendaciones del fabricante del chasis. Es posible que sea necesario modificar este valor de los mAs para lograr una densidad adecuada en la película. Efectúe una exposición para cada valor posible de KVp. Revele la película y, haciendo

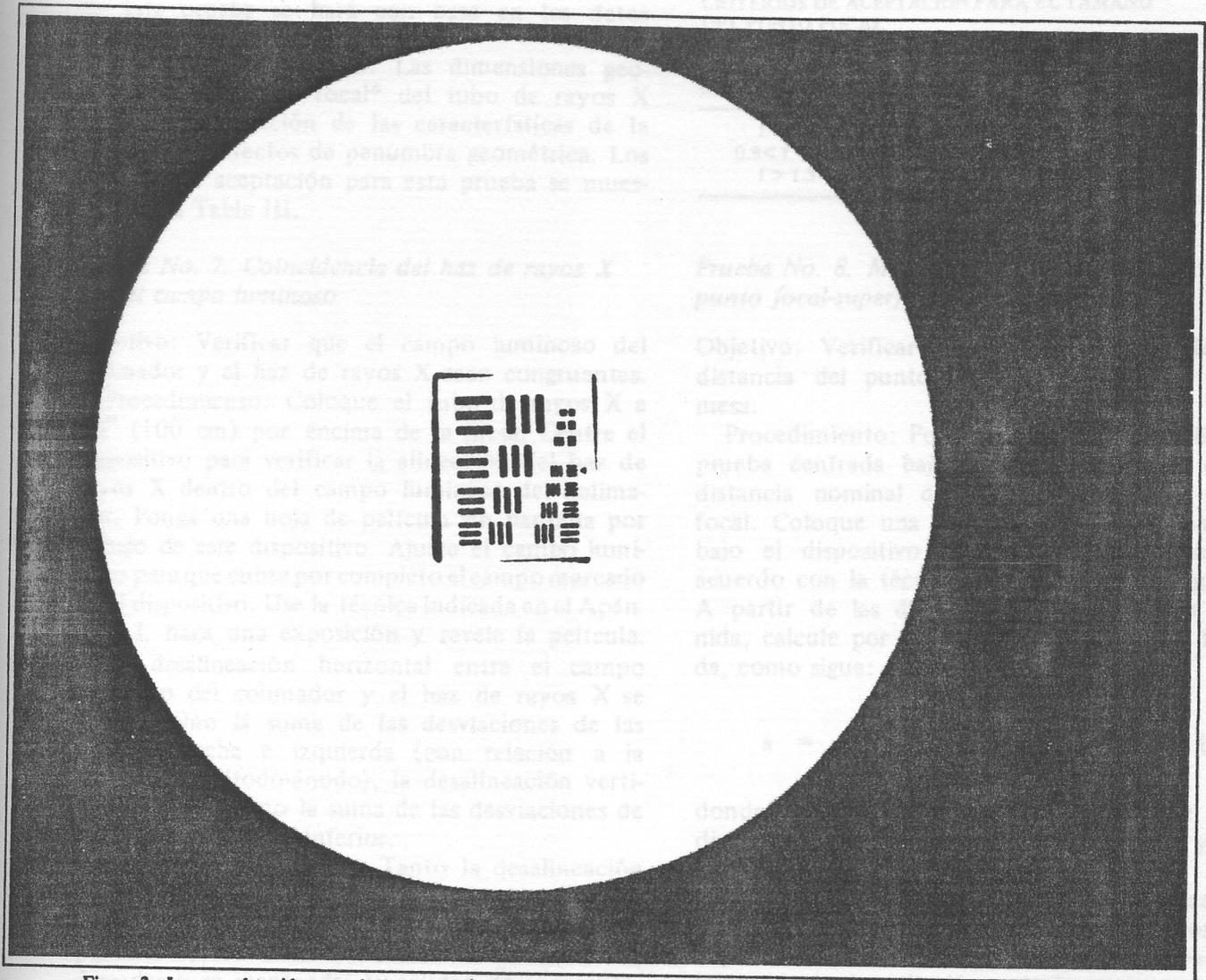


Figura 3. Imagen obtenida a partir de un patrón de barras. Se aprecia que los 3 patrones más pequeños no están resueltos.

uso del densitómetro, determine el espesor de cobre (número de escalón) para el cual exista igualdad de densidades (Figura 2). Para lograr mayor exactitud, efectúe interpolación entre escalones. Si las densidades obtenidas son menores que 0.5 o mayores que 2.0, repita las exposiciones variando el valor de los mAs. A partir de la curva de calibración del chasis y de acuerdo al tipo de unidad utilizada (1 fase o 3 fases) determine el valor de los KVp. Obtenga los errores entre los valores medidos y los esperados.

Criterio de aceptación: Los errores calculados deberán estar dentro del rango ± 4 KVp, para valores nominales entre 60 y 100 KVp, y dentro del rango ± 8 KVp para valores nominales de 120 KVp o mayores. Estos valores garantizan un control de calidad adecuado de la imagen, ya que permiten predecir la intensidad de radiación que recibe el receptor de imagen y el contraste de la misma.

Prueba No. 6. Medición del punto focal ⁸

Objetivo: Verificar que la resolución de las características de la imagen obtenida esté dentro de límites aceptables.

Procedimiento: Coloque el patrón de barras sobre una hoja de película sin pantalla (*no-screen film*), en el centro del campo de rayos X y a una distancia de 18" (45 cm) por debajo del punto focal. Haga uso del colimador para centrar y confinar el campo a la superficie del patrón. Con la técnica indicada en el Apéndice I haga una exposición para cada uno de los puntos focales del tubo, moviendo o cambiando la película entre exposiciones. Revele la película.

Se dice que un grupo de barras está definido cuando las 3 barras horizontales y las 3 verticales (Figura 3) pueden verse claramente, a ojo, en la imagen de película. Si se ven 2 ó 4 barras, o si la

imagen está borrosa, se dice que la imagen no está definida. La interpretación de los resultados de esta prueba se hará con base en los datos contenidos en la Tabla II.⁵

Criterio de aceptación: Las dimensiones geométricas del punto focal* del tubo de rayos X afectan la resolución de las características de la imagen, por efectos de penumbra geométrica. Los criterios de aceptación para esta prueba se muestran en la Tabla III.

Prueba No. 7. Coincidencia del haz de rayos X con el campo luminoso

Objetivo: Verificar que el campo luminoso del colimador y el haz de rayos X sean congruentes.

Procedimiento: Coloque el tubo de rayos X a 40" (100 cm) por encima de la mesa. Centre el dispositivo para verificar la alineación del haz de rayos X dentro del campo luminoso del colimador. Ponga una hoja de película sin pantalla por debajo de este dispositivo. Ajuste el campo luminoso para que cubra por completo el campo marcado en el dispositivo. Use la técnica indicada en el Apéndice I, haga una exposición y revele la película.

La desalineación horizontal entre el campo luminoso del colimador y el haz de rayos X se define como la suma de las desviaciones de las orillas derecha e izquierda (con relación a la orientación cátodo-ánodo); la desalineación vertical se define como la suma de las desviaciones de las orillas superior e inferior.

Criterio de aceptación: Tanto la desalineación horizontal como la vertical deberán ser menores de 1 cm. Bajo estas condiciones se evitará que el paciente reciba dosis de radiación en zonas no deseadas y se mantendrá la calidad de la imagen.

TABLA II

DATOS PARA INTERPRETAR LA IMAGEN DEL PATRON DE BARRAS

Grupo de barras más pequeño visible	Pares de líneas por mm	Valor nominal	Tamaño máximo del punto focal verdadero (mm)
1	0.6	2.8	-
2	0.7	2.5	-
3	0.85	2.3	-
4	1.0	2.0	2.60 x 3.64
5	1.15	1.8	2.34 x 3.28
6	1.4	1.5	1.95 x 2.73
7	1.7	1.3	1.5 x 2.18
8	2.0	1.0	1.4 x 1.96
9	2.5	0.8	1.12 x 1.57
10	2.9	0.6	0.90 x 1.26
11	3.35	0.5	0.75 x 1.05

* También es posible medir el tamaño del punto focal por medio de una "Estrella Siemens" o una cámara "pinhole".⁸

TABLA III

CRITERIOS DE ACEPTACION PARA EL TAMAÑO DEL PUNTO FOCAL

Tamaño especificado del punto focal (f en mm)	Límite superior permisible para el valor calculado
f < 0.8	1.5 f
0.8 < f < 1.5	1.4 f
f > 1.5	1.3 f

Prueba No. 8. Medición de la distancia punto focal-superficie de la mesa⁵

Objetivo: Verificar la exactitud del medidor de distancia del punto focal a la superficie de la mesa.

Procedimiento: Ponga la base del dispositivo de prueba centrada bajo el haz de rayos X a una distancia nominal de 40" (100 cm) del punto focal. Coloque una hoja de película sin pantalla bajo el dispositivo y haga una exposición, de acuerdo con la técnica indicada en el Apéndice I. A partir de las dimensiones de la imagen obtenida, calcule por triangulación la distancia buscada, como sigue:

$$a = \frac{bc}{d - c} \quad \text{distancia} = a + b$$

donde b es la altura del dispositivo; c es la distancia entre las orillas del dispositivo y d la longitud de la imagen proyectada.

Criterio de aceptación: El valor calculado no deberá diferir en más del 2% del valor nominal. Bajo estas condiciones se evitará que el paciente reciba dosis de radiación excesivas, ya que, como es sabido, la intensidad del haz es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al punto focal. **Prueba No. 9. Registro de la onda de**

Prueba No. 9. Registro de la onda de radiación obtenida

Objetivo: Esta prueba permite diagnosticar defectos eléctricos del generador mediante el análisis de las características de la radiación obtenida durante una exposición, con resolución suficiente para visualizar cada pulso individual de radiación.

Procedimiento: Ubique el diodo sensible a la radiación de manera tal que el haz de rayos lo cubra exclusivamente y a una distancia de 20" (50 cm) del punto focal. Conecte el diodo al osciloscopio del tal manera que el inicio de la señal dispere al barrido horizontal colocando en 10 mseg/división. La escala vertical deberá ade-

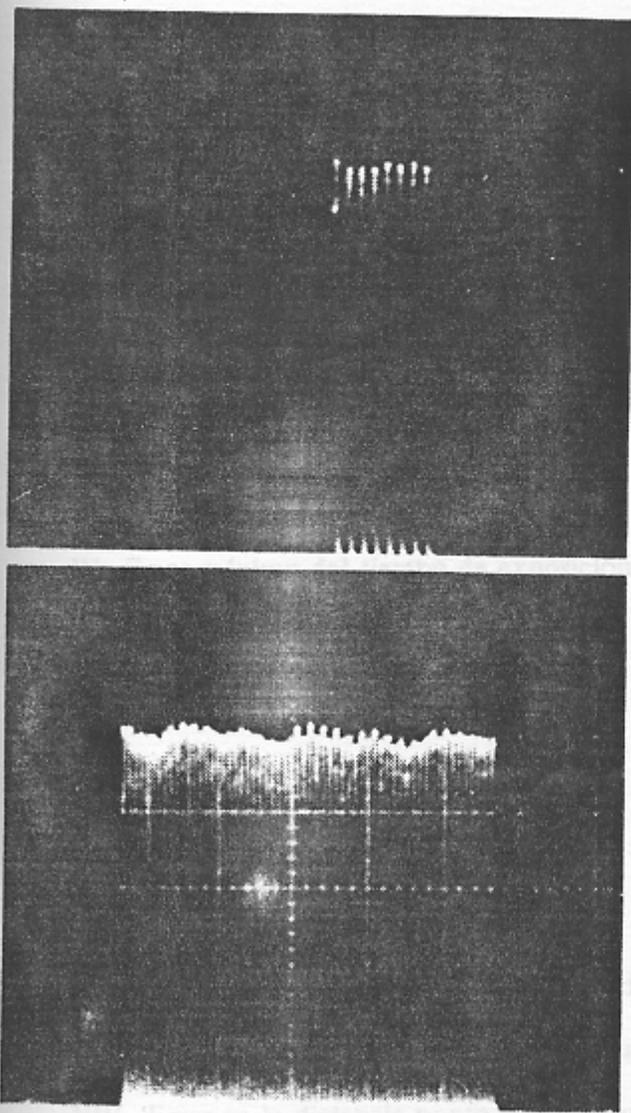


Figura 4. Fotografías de las ondas de radiación de una unidad de rayos X de una sola fase. En ambos casos el número de pulsos obtenidos es el correcto, aunque las irregularidades en los pulsos indican un mal funcionamiento de la unidad. La figura superior fue tomada con una exposición de rayos X de 1/15 seg, y la figura inferior con 1/2 seg.

cuarse al diodo particular que se esté empleando (normalmente 20 mV/división). Haga una exposición de 1/15 seg usando la técnica indicada en el Apéndice I. Si la señal obtenida en el osciloscopio es aceptable, tome una fotografía (Figura 4a); si no lo es, modifique los controles del osciloscopio hasta obtener una imagen aceptable. Repita la exposición, pero ahora usando 1/2 seg y una base de tiempo del osciloscopio de 100 mseg/división (Figura 4b).

Criterio de aceptación: El criterio de aceptación para esta prueba es variable y dependerá de la forma de onda observada en la fotografía. Se deben obtener pulsos regulares reproducibles para garantizar que el generador está operando correctamente.

APENDICE I

Técnicas radiológicas

Prueba No. 1
 Campo de 10 X 10 cm
 Distancia punto focal-mesa (DPM) 30" (75 cm)
 80 KVp
 200 mA, 1/2 seg

Prueba No. 2
 Campo de 10 X 10 cm
 DPM 30" (75 cm)
 80 KVp
 200 mA a 1/10 seg

Prueba No. 3
 Campo de 10 X 10 cm
 DPM 30" (75 cm)
 80 KVp
 1/10 seg. De ser necesario, modifíquese de acuerdo a la capacidad máxima de mA

Prueba No. 4
 Campo de 10 X 10 cm
 DPM 30" (75 cm) para equipo de una fase
 DPM 40" (100 cm) para equipo de tres fases
 80 KVp
 100 mA

Prueba No. 5
 Ver especificaciones del Chasis empleado

Prueba No. 6
 Usando el patrón de barras, DPM 24" (60 cm)
 60 KVp

Los mAs empleados dependen del tipo de película utilizada (20 mAs para película TL)

Prueba No. 7
 Campo de 20 X 20 cm
 DPM de 40" (100 cm)
 60 KVp
 20 mAs con película TL

Prueba No. 8
 70 KVp
 50 mAs

Prueba No. 9
 60-80 KVp
 100-200 mA
 1/15 seg y 1/2 seg

APENDICE II

FORMA DE CONTROL

INSTITUCION HOSPITALARIA
Departamento de Radiología

Cuarto	Unidad	Fecha
I. (HVL) Calidad del haz		mm Al
II. Emisión de radiación:		
a) Medido		mR/mAs
b) Desviación estándar		%
III. Linealidad de mA:		
Desviación máxima de la media		%
IV. Error máximo del tiempo de exposición		% a seg
V. Error medio de KVp		
	Nominal	
	60	%
	80	%
	100	%
	120	%
VI. Tamaño del punto focal		
Medio	Pequeño	Grande
Nominal	Pequeño	Grande
VII. Coincidencia del haz de rayos X con el campo luminoso		
Diferencia máxima	cm	
VIII. Error en la distancia punto focal-superficie de mesa		
Diferencia entre el indicado y el medido	cm	
IX. Fotografías		
A. 1/15 seg.	B. 1/2 seg.	

BIBLIOGRAFIA

1. American Association of Physics in Medicine. *Basic quality control in diagnostic radiology*, 1976.
2. Federal Register, Part 1020. *Performance standards for ionizing radiation emitting products*, V38 (198), oct. 15, 1973.
3. Handee, Chaney, Rossi. *Radiologic Physics, equipment and quality control*, Year Book Medical Publishers, Inc. Chicago, 1977.
4. Hendee, W.R., Rossi, R.P. Performance specification for diagnostic X-ray equipment, *Radiology*, V120 (409), 1976.
5. NEMA. *Test methods for X-ray equipment*, New York, 1970.
6. Ter-Pogossian, M.M. *The physical aspects of diagnostic radiology*, Harper and Row, 1967.
7. Thompson, Th. *A practical approach to X-ray equipment*, Little Brown and Co., Boston, 1978.
8. US Department of Commerce, National Bureau of Standards. *Methods of evaluating Radiological equipment and materials, Handbook 89*, Recommendations of the International Commission on Radiological Units and Measurements, Washington, D.C., 1963.