

Capítulo 6

CONTROL DE CALIDAD EN TOMOGRAFÍA POR EMISIÓN DE POSITRONES

La tomografía por emisión de positrones se basa en la detección en coincidencia del par de fotones de aniquilación de 511 keV, emitidos en direcciones opuestas como consecuencia de la aniquilación de un positrón con un electrón. La detección en coincidencia de ambos fotones permite ubicar su origen a lo largo de la línea entre los dos detectores que registran el evento de aniquilación. Mediante la adquisición de un elevado número estas líneas, denominadas líneas de respuesta, es posible reconstruir la distribución radiactiva en el objeto estudiado.

Este mecanismo de detección, conocido como detección en coincidencia, evita el uso de colimadores para determinar la dirección de los fotones de emisión, lo que contribuye al aumento significativo de la sensibilidad del instrumento. La detección de los fotones de aniquilación por un par de detectores en coincidencia, define un volumen en lugar de una línea, desde el que los fotones emitidos simultáneamente pueden ser detectados. Dado que la sección transversal de los detectores puede ser cuadrada o rectangular, este volumen esencialmente tiene una sección transversal de tamaño igual a la de los detectores.

Se asume que una coincidencia ocurre cuando los fotones correspondientes a un evento de aniquilación son registrados dentro de una ventana de tiempo, conocida como ventana de coincidencia, que típicamente es de 4 ns a 12 ns. Esta pequeña ventana de tiempo es necesaria, porque los fotones de aniquilación, aunque son emitidos simultáneamente, se registran con una diferencia de tiempo, debido a que las distancias recorridas por ambos fotones desde la posición de aniquilación hasta los detectores son diferentes. De esta manera, la diferencia en los tiempos de arribo de ambos fotones contiene información de la distancia recorrida por ellos y, en teoría, pueden definir la posición exacta del evento de aniquilación a lo largo de la líneas de respuesta.

Debido a que los detectores de un equipo tomografía por emisión de positrones no poseen una precisión de tiempo óptima, tienen asociado un tiempo de resolución finito. La incertidumbre que gobierna el tiempo de resolución en los tomografía por emisión de positrones se debe a la naturaleza aleatoria de las señales, al ruido electrónico y a los circuitos electrónicos

empleados para determinar el tiempo en el que ocurrió el evento de aniquilación. Para dos detectores de características similares, las incertidumbres de tiempo típicamente pueden ser descritas por una distribución gaussiana y el tiempo de resolución es definido como el ancho del fotopico a mitad de su altura de esa distribución. Para los equipos tomografía por emisión de positrones actuales, la resolución temporal típica varía de 0,3 ns a 5 ns en dependencia del cristal centellante y fotodetector empleado.

La técnica que incorpora la medición de la diferencia de los tiempos de arribo de los fotones de aniquilación, en el proceso de reconstrucción tomográfica, se conoce como tiempo de vuelo. Si la diferencia de los tiempos de arribo de los fotones de aniquilación es Δt , la ubicación del evento de aniquilación respecto al punto medio entre dos detectores (Δd) es igual a:

$$\Delta d = (\Delta t c) / 2 \quad (6.1)$$

Donde:

c: velocidad de la luz.

De acuerdo con la expresión anterior, durante el proceso de reconstrucción, los eventos son retroproyectados con una probabilidad que sigue una distribución gaussiana centrada a una distancia Δd del punto medio entre los detectores, con un ancho del fotopico a mitad de su altura igual al tiempo de resolución del par detector. En ausencia de la información de tiempo de vuelo, como no existe información aproximada de la ubicación del evento de aniquilación, durante el proceso de reconstrucción los eventos son retroproyectados con igual probabilidad de ocurrencia a lo largo de la línea de retroproyección. La reducción de la incertidumbre en la ubicación del evento de aniquilación con el empleo de la técnica de tiempo de vuelo contribuye a mejorar la relación señal-ruido durante la reconstrucción tomográfica.

Existen varios factores que afectan la resolución espacial de la tomografía por emisión de positrones. Para los equipos actuales con detectores discretos, la resolución espacial depende del tamaño individual de los detectores en coincidencia. Para una fuente puntual ubicada en el centro de ambos detectores, la función de respuesta adopta una forma funcional triangular:

$$\text{FWHM} = d / 2 \quad (6.2)$$

Donde:

d: ancho de elemento detector.

FWHM: ancho del fotopico a mitad de su altura.

A medida que la fuente se mueve hacia uno de los detectores, la función de respuesta adopta una forma trapezoidal, y llega a rectangular en la cara del detector con $\text{FWHM} = d$.

Para esta geometría, la resolución espacial varía solo en 30 %, en el 60 % del espacio central entre ambos detectores. En la tomografía por emisión de positrones modernos, las dimensiones transversales de los detectores varían entre 4 mm y 6 mm.

Otro factor que afecta la resolución espacial es el rango del positrón. Los positrones, cuando son emitidos por un núcleo radiactivo, migran por el medio cediendo parte de su energía antes de aniquilarse. De esta manera, la tomografía por emisión de positrones registra el evento de aniquilación, que no se corresponde con la posición del núcleo radiactivo que emitió el positrón al desintegrarse. Debido a que el perfil de distribución del rango de positrones no se describe bien mediante una función gaussiana, el ancho del fotopico a mitad de su altura no es el parámetro que mejor define los efectos del rango del positrón en la resolución espacial. En su lugar, el parámetro de interés empleado para definir la resolución espacial es la raíz media cuadrada del rango efectivo del positrón.

El rango efectivo del positrón es la distancia promedio desde el núcleo que se desintegra hasta que este positrón se aniquila con un electrón y es medida perpendicularmente a la línea definida por la dirección de los fotones de aniquilación. Los valores típicos de la raíz media cuadrada del rango efectivo varían entre 0,5 mm y 3 mm. Estos valores son proporcionalmente mayores en tejidos menos densos, como los pulmones, y menores en tejidos más densos, como el hueso. La no colinealidad de los fotones de aniquilación es otro factor que afecta la resolución espacial. Esto se debe a la existencia de un pequeño momento residual del positrón al final de su rango. La distribución angular puede ser descrita por una función gaussiana con un ancho del fotopico a mitad de su altura de $0,5^\circ$ aproximadamente. El efecto de este fenómeno sobre la resolución espacial, expresado en términos de ancho del fotopico a mitad de su altura, depende linealmente de la separación de los detectores en coincidencia. La separación típica en la tomografía por emisión de positrones de cuerpo completo es de 80 cm, lo que produce un ancho del fotopico a mitad de su altura igual a 2 mm, aproximadamente.

En los equipos tomografía por emisión de positrones, los centellantes empleados tienen un espesor que varía entre 2 cm y 3 cm, lo que es necesario para detectar de forma eficiente los fotones de aniquilación de 511 keV. Para los sistemas de tomografía por emisión de positrones que emplean arreglos de detectores en múltiple coincidencia, ubicados en forma de anillo alrededor del objeto, el espesor relativamente grande de los detectores degrada la resolución espacial. Este efecto es conocido como profundidad de interacción.

Para una fuente ubicada cercana al centro del detector, la resolución espacial está determinada por el ancho del elemento detector, sin embargo, para una fuente que se aleja del centro del detector, el ancho aparente del detector aumenta. Este aumento aparente del ancho del detector se debe a la disposición angular de los detectores y a que no se puede determinar la profundidad a la que tiene lugar la interacción dentro del cristal. Para detectores de espesor entre 2 cm y 3 cm, el ancho aparente puede variar entre 3 mm y 6 mm. Para equipos tomografía por emisión de positrones, con detectores de ancho igual a 4 mm y 80 cm de diámetro de anillo, el efecto de profundidad

de interacción produce una degradación de la resolución espacial de 40 % a una distancia de 10 cm del centro del campo de visión. Para otras configuraciones, como los arreglos hexagonales u octogonales, a medida que la fuente se aleja del centro del campo de visión, este efecto tiene lugar solo a distancias comparables con el ancho del arreglo de detectores y, por lo tanto, es comparativamente menor a través del campo de visión de estos tomógrafos.

En la actualidad la resolución espacial que puede ser alcanzado por la tomografía por emisión de positrones en términos de ancho del fotopico a mitad de su altura varía entre 4 mm y 6 mm.

La necesidad de emplear una ventana de coincidencia permite que otros tipos de eventos puedan ocurrir en coincidencia simultáneamente. De esta manera, los eventos detectados por tomografía por emisión de positrones consisten no solo en coincidencias verdaderas, sino también eventos no deseados que ocurren a causa de otros mecanismos de interacción, en el paciente y en el detector, que no aportan información útil.

Cuando dos eventos de aniquilación válidos son detectados en coincidencia, la posición de los dos eventos define una línea de respuesta (líneas de respuesta) y el evento es registrado. Otros eventos, como los de dispersión y los aleatorios detectados como válidos, pueden ocurrir en coincidencia y ser registrados. Los eventos aleatorios ocurren cuando dos fotones originados a partir de eventos de aniquilación diferentes son detectados en coincidencia. Los eventos de dispersión ocurren cuando uno o ambos fotones de aniquilación interaccionan por efecto Compton, se desvían de su trayectoria original y son detectados como eventos válidos en coincidencia. Ambos tipos de eventos, dispersión y aleatorios, producen líneas de respuesta mal posicionadas que degradan la calidad de las imágenes reconstruidas.

Las coincidencias totales detectadas por un de equipo tomografía por emisión de positrones, pueden expresarse como la suma de las coincidencias verdaderas, de dispersión y aleatorias.

Los sistemas de tomografía por emisión de positrones modernos operan en modo 3D, de tal manera que todas las posibles líneas de respuesta pueden ser registradas. Esto produce un incremento significativo de la sensibilidad de las coincidencias verdaderas, a expensas del incremento de la sensibilidad de las coincidencias de dispersión y las aleatorias. En modo 3D el perfil de sensibilidad en el plano axial muestra una forma triangular con el valor máximo en el centro del campo de visión.

Pruebas para el control de calidad en tomografía por emisión de positrones

Pruebas de aceptación y referencia

Después de instalado y antes de su uso clínico, tanto a los equipos como a los sistemas de tomografía por emisión de positrones, se les deben reali-

zar las pruebas de aceptación para verificar que el instrumento se comporta de acuerdo con las especificaciones reportadas por su fabricante.

Los fabricantes de sistemas de tomografía por emisión de positrones/tomografía computarizada especifican los parámetros de funcionamiento de la tomografía por emisión de positrones de acuerdo con las normas internacionales NEMA.

Se recomiendan las normas NEMA cuando sean aplicables como pruebas de aceptación para los sistemas de tomografía por emisión de positrones/tomografía computarizada. Generalmente pueden realizarse pruebas adicionales de aceptación definidas por el usuario. A partir de los resultados de las pruebas de aceptación, se obtienen los parámetros de referencia que se emplean en las pruebas de control de calidad rutinarias durante el tiempo de explotación del equipo.

En la actualidad predominan los sistemas multimodales tomografía por emisión de positrones/tomografía computarizada y tomografía por emisión de positrones/resonancia magnética. Por esta razón, la componente tomografía por emisión de positrones de estos sistemas debe ser evaluada siguiendo las recomendaciones dadas en este protocolo nacional, mientras que la otra componente es evaluada siguiendo la norma apropiada para esa tecnología.

Teniendo en cuenta lo anterior, para la componente tomografía por emisión de positrones de los tomógrafos multimodales, las pruebas de aceptación recomendadas se muestran en la tabla 6.1.

En este capítulo las pruebas de aceptación no son descritas explícitamente, para esto se deben consultar las publicaciones NEMA NU 2-2007 o NEMA NU 2-2012 y los manuales de usuario del equipo en cuestión. Varios fabricantes proporcionan programas específicos para sus equipos que respetan íntegramente la norma NEMA, en estos casos, se deben consultar los manuales de usuario donde se describen detalladamente estos procedimientos.

Tabla 6.1. Pruebas de aceptación recomendadas para la componente tomografía por emisión de positrones de los tomógrafos multimodales

Pruebas	Observaciones
Resolución energética	Según protocolo del fabricante
Resolución temporal (para tomografía por emisión de positrones con tiempo de vuelo)	Según protocolo del fabricante
Resolución espacial	Según NEMA NU 2-2007 / NEMA NU 2-2012
Fracción de dispersión, pérdidas de conteos y medición de eventos aleatorios	Según NEMA NU 2-2007 / NEMA NU 2-2012
Sensibilidad	Según NEMA NU 2-2007 / NEMA NU 2-2012
Exactitud: correcciones por pérdidas de conteos y eventos aleatorios	Según NEMA NU 2-2007 / NEMA NU 2-2012
Calidad de imagen, exactitud de la corrección de atenuación y dispersión	Según NEMA NU 2-2007 / NEMA NU 2-2012

En algunas pruebas, los fabricantes recomiendan determinados valores para la actividad a utilizar. Debido a que la actividad óptima para cada prueba puede variar de un sistema a otro, se debe emplear los valores de actividad recomendadas por el fabricante para las diferentes pruebas. También, es esencial la sincronización de los relojes de los equipos, activímetros y sistemas de cómputo que intervienen en las pruebas. Este requerimiento es fundamental para la exactitud de las cantidades de actividad empleadas en las pruebas y para el análisis cuantitativo de los datos.

Las pruebas de aceptación recomendadas deben realizarse por el fabricante o un representante de este en presencia de un físico médico calificado.

Pruebas rutinarias

Una vez que el sistema se ha aceptado, su comportamiento puede verificarse a través de pruebas rutinarias de control de calidad que sean sensibles a los cambios de comportamiento del sistema. Estas pruebas deben realizarse por personal calificado y entrenado. Los procedimientos normalizados de operación para cada prueba rutinaria de control de calidad, deben ser escritos teniendo en cuenta las recomendaciones dadas en este protocolo.

Los resultados de las pruebas deben ser registrados adecuadamente y sus variaciones monitoreadas periódicamente. Los fabricantes de tomografía por emisión de positrones/tomografía computarizada o tomografía por emisión de positrones/resonancia magnética, generalmente recomiendan los procedimientos de control de calidad rutinarios para sus equipos y la frecuencia de realización de estos. Cada fabricante establece procedimientos específicos para sus productos. El programa de control de calidad en cada institución debe tener en cuenta las pruebas recomendadas por el fabricante. Se toman acciones correctivas apropiadas cuando se observen cambios significativos en los parámetros evaluados.

Se muestra el programa de pruebas de control de calidad propuesto para la componente tomografía por emisión de positrones de los sistemas multimodales tomografía por emisión de positrones/tomografía computarizada o tomografía por emisión de positrones/resonancia magnética (Tabla 6.2).

Control de calidad diario

Objetivo

El objetivo de esta prueba es verificar la constancia del comportamiento del detector del tomógrafo tomografía por emisión de positrones.

Frecuencia

Esta prueba se realiza diariamente por el tecnólogo antes del uso clínico del tomógrafo.

Tabla 6.2. Pruebas de control de calidad propuesto para la componente tomografía por emisión de positrones de los sistemas multimodales

Pruebas	Frecuencia	Responsable
Control de calidad diario	Diaria	Tecnólogo
Resolución temporal (para tomografía por emisión de positrones con tiempo de vuelo)	Diaria	Tecnólogo
Normalización	Variable (según fabricante) o después de reparaciones/ instalaciones de nuevos programas	Físico médico o servicio técnico
Calibración/verificación de la concentración radiactiva	Variable (según fabricante) o después de normalización	Físico médico o servicio técnico
Uniformidad	Variable (según fabricante) o después de reparaciones/ instalaciones de nuevos programas/normalización	Físico médico
Calidad de imagen	Anual	Físico médico

Materiales

Se emplean diferentes fuentes radiactivas en dependencia del tomógrafo empleado. Las más comunes son:

- Fuente lineal rotatoria de germanio-68.
- Cilindro con concentración radiactiva uniforme de germanio-68, centrado horizontal y verticalmente en el campo de visión de tomografía por emisión de positrones.
- Fuente puntal de sodio-22, montada en un soporte y ubicada en el centro del campo de visión de tomografía por emisión de positrones (Fig. 6.1).



Fig. 6.1. Ubicación de una fuente puntal de sodio-22 en el centro del campo de visión del tomógrafo Phillips Gemini TF64.

Las actividades de las fuentes deben estar en el rango especificado por el fabricante de la tomografía por emisión de positrones.

Procedimiento

Ejecutar el protocolo suministrado por el fabricante para la tomografía por emisión de positrones.

Análisis de los resultados

- Buscar mediante inspección visual detallada la presencia de artefactos en el sinograma de emisión.
- Algunos fabricantes suministran herramientas cuantitativas para el análisis y reporte de control de calidad diario.

Límites de aceptación

Los límites de aceptación para esta prueba los provee el fabricante para su equipo como parte del protocolo del control de calidad diario.

Acciones correctivas

- Cualquier resultado fuera de los límites de aceptación permitidos o la presencia de artefactos en el sinograma de emisión (Fig. 6.2) deben investigarse antes de iniciar los estudios clínicos.
- Pequeños cambios en el sinograma de emisión pueden ser solucionados realizando la normalización del detector.
- Cambios bruscos en el sinograma de emisión pueden requerir la recalibración de los detectores o reemplazo de componentes defectuosos en los detectores.

Resolución temporal

Objetivo

El objetivo de esta prueba es verificar la constancia del tiempo de resolución en tomógrafos con tiempo de vuelo.

Frecuencia

Esta prueba se realiza diariamente por el tecnólogo antes del uso clínico del tomógrafo.

Materiales

Fuente puntual de un radioisótopo de vida media larga (sodio-22 u otro recomendado por el fabricante) dentro de un medio dispersante.

Procedimiento

1. Ubicar la fuente en el centro del campo de visión de la tomografía por emisión de positrones dentro de un medio dispersante.
2. Ejecutar el protocolo del fabricante.

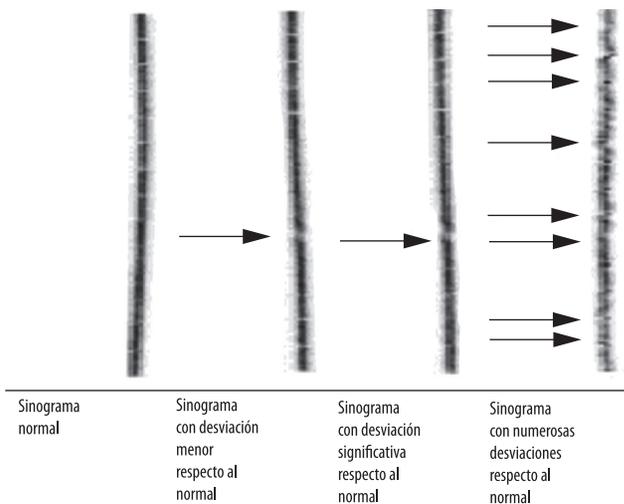


Fig. 6.2. Sinogramas de emisión que muestran comportamientos diferentes (cortesía de Phillips Hearth Care).

Análisis de los resultados

Emplear el procedimiento del fabricante para obtener el valor de resolución temporal de coincidencia en términos de ancho del fotopico a mitad de su altura.

Límites de aceptación

El valor medido de resolución temporal no debe exceder en 1,05 el valor especificado por el fabricante para la tomografía por emisión de positrones.

Acciones correctivas

- La resolución temporal debe ser un parámetro con un comportamiento constante.
- Si el límite de aceptación es excedido, debe repetirse la prueba para confirmar el hallazgo.
- Si el resultado de la prueba se confirma, debe realizarse una recalibración por parte del servicio técnico.

Normalización

Objetivo

Adquirir los datos de eficiencia de los pares de detectores en coincidencia para corregir los sinogramas por las variaciones de uniformidad del detector tomografía por emisión de positrones.

Materiales

Dependiendo de la tomografía por emisión de positrones o del fabricante y del modo de adquisición (2D o 3D), se emplean diferentes fuentes y maniqués. Los más comunes son:

- Fuente lineal de germanio-68 rotatoria.
- Cilindro uniforme de germanio-68, centrado vertical y horizontalmente en el campo de visión de la tomografía por emisión de positrones.
- Fuente puntual de cesio-137 rotatoria.
- Fuente rellenable de flúor-18.

Procedimiento

1. Realizar un *backup* del fichero de normalización previo.
2. Ejecutar el protocolo de adquisición del fabricante.

Análisis de los resultados

- Realizar la inspección visual de los sinogramas de normalización.
- Si no se observan problemas, guardar los nuevos datos de normalización según establezca el fabricante.

Límites de aceptación

La inspección visual de los sinogramas debe ser aceptable.

Acciones correctivas

- En caso necesario considerar la recalibración del sistema.
- Si el problema persiste, llamar al servicio técnico.

Calibración/verificación de la concentración radiactiva

Objetivo

Determinar los factores de calibración para convertir los valores de intensidad de los *voxels* de las imágenes en valores de concentración radiactiva.

Materiales

- Maniquí cilíndrico con distribución uniforme de germanio-68, centrado horizontal y verticalmente en el campo de visión de la tomografía por emisión de positrones.
- Maniquí rellenable con distribución uniforme de flúor-18 centrado horizontal y verticalmente en el campo de visión de la tomografía por emisión de positrones (Fig. 6.3).

Procedimiento

1. Hacer un *backup* del fichero de calibración previo.
2. Adquirir los datos de calibración de acuerdo con el protocolo del fabricante.
3. Acumular una cantidad suficiente de eventos para asegurar buena estadística de datos.

Análisis de los resultados

Si los resultados son los esperados, los nuevos datos de calibración deben guardarse en un fichero siguiendo las instrucciones del fabricante.

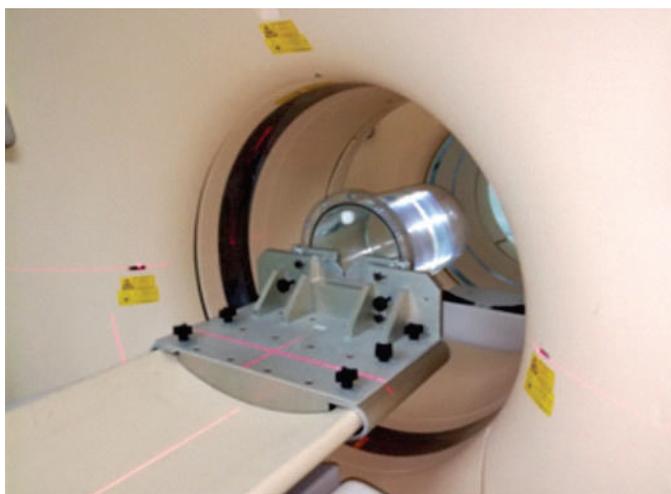


Fig. 6.3. Maniquí renovable con flúor-18 para la calibración de la concentración radiactiva.

Límites de aceptación

Los resultados de las calibraciones deben corresponderse con las especificaciones del fabricante.

Acciones correctivas

- En caso de desviaciones significativas considerar la recalibración del sistema.
- Si el problema persiste llamar al servicio técnico.

Uniformidad

Objetivo

Verificar la respuesta del sistema a una distribución uniforme de actividad en el campo de visión axial y transversal.

Materiales

- Maniquí cilíndrico de diámetro externo de $203 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$, espesor de la pared de $3 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$, largo de la cavidad interna de $190 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$.
- Solución radiactiva uniforme de flúor-18 de 120 MBq a 130 MBq.
- Activímetro calibrado.
- Alternativamente, emplear maniquí comercial con distribución uniforme de germanio-68 (Fig. 6.4).

Procedimiento

1. El cilindro se llena con una solución radiactiva uniforme de flúor-18 recomendada por el fabricante.
2. Registrar la actividad medida y el tiempo de medición.
3. Suspender el maniquí en aire, centrarlo en el campo de visión axial y desplazarlo 25 mm en la dirección vertical.
4. Realizar las adquisiciones en los modos disponibles (2D o 3D).

5. En caso de emplear la fuente de germanio-68, adecuar el tiempo de adquisición a la actividad del maniquí.



Fig. 6.4. Maniquí cilíndrico uniforme de germanio-68.

Análisis de los resultados

- Los cortes centrales del maniquí deben ser reconstruido empleando todas las correcciones.
- Emplear el protocolo de reconstrucción usado en la clínica.
- Los cortes reconstruidos deben ser visualizados y observados cuidadosamente para evaluar las no uniformidades presentes.

Límites de aceptación

- Las imágenes obtenidas deben ser evaluadas cualitativamente.
- En caso de análisis cuantitativo el criterio aceptado es:

$$\%NU_{\text{medido}} < 1,05 \%NU_{\text{referencia}} \quad (6.3)$$

Donde:

NU: no uniformidad.

Acciones correctivas

- Si aparecen artefactos o los parámetros de uniformidad están fuera de la tolerancia, debe re-comprobarse el control de calidad diario y considerar la recalibración del sistema.
- Si persiste el problema llamar al servicio técnico.

Calidad de imagen

Objetivo

- Evaluar la calidad de imagen mediante el cálculo del contraste y la razón de variabilidad del fondo radiactivo en esferas frías y calientes.
- Estimar la exactitud de las correcciones de atenuación y de dispersión.

- Evaluar la exactitud de la cuantificación absoluta de la concentración radiactiva en un volumen de interés dentro del maniquí.

Materiales

- Maniquí NEMA de calidad de imagen.
- Maniquí NEMA de dispersión.

Procedimiento

1. Preparar los maniqués según procedimiento NEMA NU-2007/NEMA NU-2012.
2. Ubicar el maniquí de calidad de imagen en la camilla y a continuación el maniquí de dispersión (Fig. 6.5).
3. Adquirir las imágenes según procedimiento NEMA NU-2007/NEMA NU-2012.
4. Las imágenes deben ser reconstruidas empleando los protocolos recomendados por el fabricante para cuerpo total.



Fig. 6.5. Ubicación de los maniqués para la prueba de calidad de imagen.

Análisis de los resultados

- Examinar los cortes reconstruidos buscando la presencia de artefactos en las imágenes.
- Realizar el análisis cuantitativo según la norma NEMA para esta prueba.

Límites de aceptación

Los resultados deben de estar dentro de las especificaciones del fabricante.

Acciones correctivas

- Si hay presencia de artefactos en las imágenes reconstruidas, resultados incongruentes respecto a la distribución de la actividad en el maniquí, y valores de referencia por encima de los límites de aceptación, se deben repetir los controles diarios y considerar la recalibración del sistema.
- Si el problema persiste, debe intervenir el servicio técnico.