



INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE LA CALIDAD (CC) EM MEDICINANUCLEAR

Ricardo Ruggeri

Eliana Quinteros

Colaboradora

Ezequiel Larger

Colaborador

Marco A. Coca

Colaborador

José Luis Rodríguez

Colaborador

Carlos Eduardo de Almeida

Colaborador

de la actividad de los radionúclidos, en la adquisición y procesamiento de las imágenes, en la creación de perfiles o curvas de actividad acumulativa en órganos de interés (ejemplo: captación tiroidea), etc.

Es fundamental realizar controles sistemáticos a los diferentes componentes de la cadena de equipos y procesos que intervienen en la obtención del resultado final, ya sea este una imagen diagnóstica o un tratamiento eficaz, así como garantizar la seguridad de los pacientes y del personal de operación.

Existen varios protocolos y documentos técnicos internacionales que contemplan los diferentes controles que se deben hacer a la instrumentación en medicina nuclear, varios de ellos se pueden encontrar en la referencia. Este capítulo ofrece información sobre los controles de calidad esenciales de los diferentes equipos que se emplean en medicina nuclear, cada país u organización deberá implementar los protocolos más adecuados a su realidad.

Un Programa de garantía de la calidad incluye muchos más aspectos que los chequeos periódicos del equipamiento, en este capítulo se proponen los controles de calidad más importantes referentes a los

1. INTRODUCCIÓN

La medicina nuclear es una especialidad médica que utiliza radiotrazadores y radiofármacos tanto para diagnóstico, a partir de la visualización de la biodistribución de estos luego de ser administrados, como para tratamiento, dependiendo tanto del isótopo empleado como la molécula a la cual se adhiere. En la actualidad ha alcanzado un papel relevante en el diagnóstico, seguimiento y terapia de pacientes principalmente oncológicos.

El éxito de la medicina nuclear depende, en gran parte, del correcto funcionamiento de todos y cada uno de los sofisticados equipos que se utilizan en la medición

equipos comunes en un servicio de medicina nuclear: Activímetro, Contadores de pozo y sondas de captación, Sondas intraoperatorias, Cámara gamma o SPECT y PET, incluyendo los equipos híbridos con el componente de tomografía computada (CT), indicando las pruebas, maniquís o fantasmas y los elementos necesarios para llevar a cabo cada uno de ellos; como así también la frecuencia y responsable de llevarlas a cabo.

2. CONTROL DE LA CALIDAD DE CALIBRADORES DE DOSIS O ACTIVÍMETRO

Un calibrador de dosis o activímetro es una cámara de ionización de gas tipopozo, en la cual se introduce una sustancia radiactiva para medir su actividad. Estase mide en unidades de actividad (Becquerel o Curie) a partir de la corriente de ionización que producen las radiaciones emitidas al interactuar con el gas de la cámara.

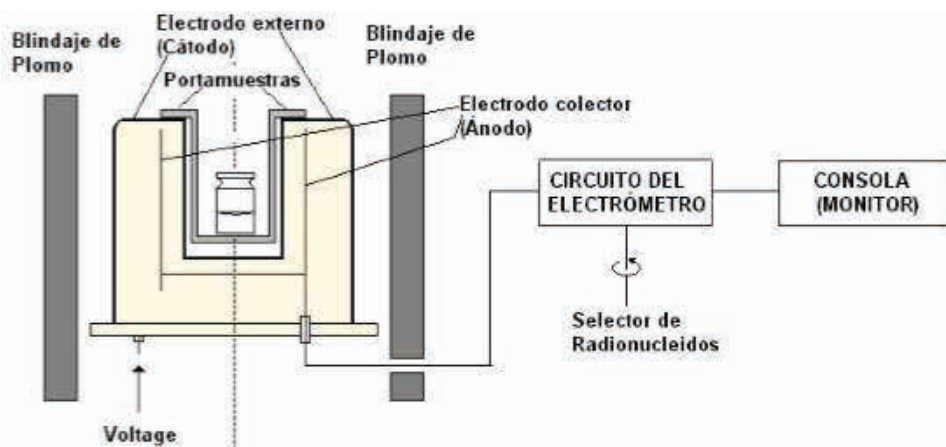


Figura 1 – Esquema básico de un Calibrador de dosis.

Fuente: Colectivo de autores. (2011). Control de la calidad de la instrumentación en Medicina Nuclear. Cuba: Cubaenergía.

De la actividad medición por el activímetro depende la dosis administrada al paciente, la calidad del estudio realizado y la protección radiológica del personal. Por eso es de suma importancia asegurar el correcto funcionamiento de estos instrumentos realizando las pruebas de control de calidad adecuadas para ello.

La Tabla 2-1 enlista las pruebas esenciales recomendables para el control de la calidad de un calibrador de dosis, las frecuencias y tolerancias que se sugieren.

Activímetro						
Prueba	Descripción	Importancia	Tipo y frecuencia	Materiales	Responsable	Tolerancia
Inspección general	Verificar que un equipo recién instalado esté completo.	Esencial	Aceptación Referencia: tras cambios.	Especificaciones técnicas de compra, oferta y contrato.	Físico médico	De acuerdo a lo reportado por el fabricante.
Respuesta al fondo	Verificar la respuesta al fondo en las condiciones de operación diarias	Esencial	Constancia: diaria.	Sin materiales adicionales	Referencia: Físico médico Constancia: técnico.	$\pm 20\%$ del valor establecido como referencia
Reproducibilidad	Verificar constancia de las mediciones con una fuente calibrada.	Esencial	Referencia: semestral Constancia: diaria.	Fuente sellada y certificada de ^{137}Cs .	Referencia: Físico médico Constancia: técnico.	El valor medido estará $\pm 5\%$ del valor obtenido en prueba de referencia.
Exactitud	Verificar correcta lectura con una fuente calibrada.	Esencial	Aceptación Constancia: trimestral	Fuente sellada y certificada de ^{137}Cs .	Físico médico	Valor absoluto de la desviación menor al 10%
Precisión	Estimar la repetibilidad de las mediciones.	Esencial	Aceptación Constancia: trimestral	Fuente sellada y certificada de ^{137}Cs .	Físico médico	Valor absoluto del CV < $\pm 3\%$.
Linealidad de la respuesta con la actividad	Verificar la linealidad de la respuesta en todo su rango de uso.	Esencial	Aceptación Constancia: anual	Fuente con una actividad mayor que las empleadas en la práctica clínica	Físico médico	La diferencia relativa en cada punto no debe superar 5%.

Tabla 2-1 – Controles de la calidad de Calibradores de dosis o activímetro.

A continuación, se muestra el ejemplo de un procedimiento. Se recomienda que cada institución realice sus procesos, procedimientos e instrucciones y desarrolle el manual de normas:

Exactitud

Objetivo: Comprobar la exactitud de la medición del equipo en una fuente calibrada.

Tipo y frecuencia: Aceptación y constancia: trimestral.

Responsable: Físico médico.

Materiales: Fuente sellada y certificada de ^{137}Cs .

Procedimiento:

- Encender el equipo 30 minutos antes de realizar la prueba.
- Verificar que no haya fuentes radioactivas que puedan alterar las mediciones.
- Tomar la medición del fondo.
- Realizar 10 mediciones de la actividad de la fuente. Entre cada lectura, retirar la fuente.
- La exactitud se representa con la desviación relativa de la medición respecto al valor calibrado de la fuente de referencia:

$$\varepsilon_r = \left(\frac{\bar{A} - A_c}{A_c} \right) \times 100 \quad (1)$$

donde \bar{A} es el valor medio de las mediciones tomadas y A_c la actividad de la fuente de referencia corregida por el decaimiento desde la calibración.

Tolerancias: $|\varepsilon_r| < 10\%$.

3. CONTROL DE LA CALIDAD DE SONDAS DE CAPTACIÓN Y SONDAS INTRAOPERATORIAS

Los sistemas de conteo de radiación son utilizados para varios fines en medicina nuclear. Los sistemas de conteo *in vitro* son utilizados para medir la actividad radiactiva de muestras biológicas, para identificación de radionúclidos, control de calidad en radiofarmacia. Los sistemas de conteo *in vivo* son utilizados para medir la radiactividad en humanos o experimentalmente en animales. Todos estos sistemas de conteo contienen los siguientes componentes básicos: un detector de centelleo con una fuente de alto voltaje, un preamplificador, un amplificador, un analizador mono o multicanal y un escalímetro temporizador análogo o digital, un medidor de tasa de conteo y una computadora o microprocesador para el análisis y lectura de datos.

Las sondas de captación y las intraoperatorias son sistemas que permiten medir la concentración de actividad en regiones bien específicas de los pacientes. Lo habitual es que el detector sea un cristal centellador como el NaI (TI). Un sistema de colimación sirve para disminuir el impacto de la radiación procedente de zonas distintas a la del tejido bajo estudio. La radiación gamma que se absorbe o se dispersa en el cristal, provoca centelleos luminosos que se transforman en pulsos eléctricos en el fotocátodo de un tubo fotomultiplicador que se encuentra acoplado ópticamente al cristal. Estos pulsos son amplificados para pasar a los circuitos electrónicos asociados, en donde son amplificados aún más, se analizan sus alturas y se cuentan.

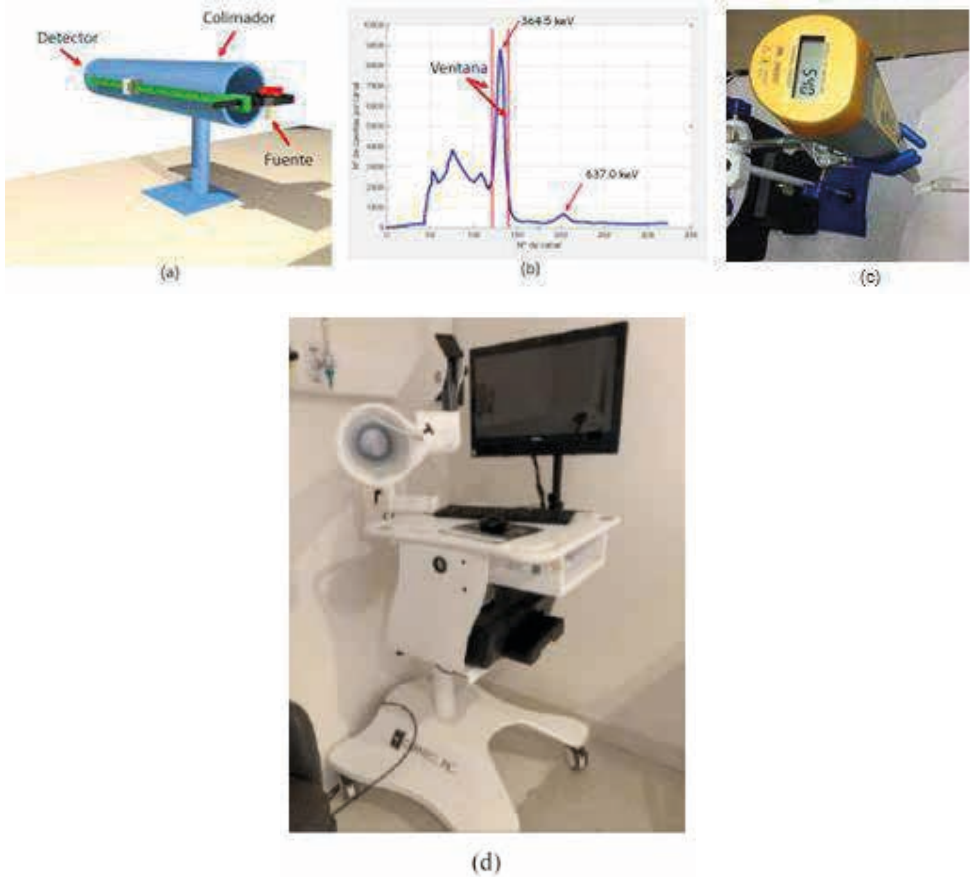


Figura 2 – (a) Sonda de captación. (b) Espectro y ventana. (c) Sonda intraoperatoria Gamma Finder (d) Sistema típico de sonda de NaI(Tl) para medir la captación de yodo radiactivo en la tiroides (Capintec, Inc.).

Fuente: Physics in Nuclear Medicine.

Las Tabla 3-1 y 3-2 enlistan las pruebas esenciales recomendables para el control de la calidad de una sonda de captación y una sonda intraoperatoria, la frecuencia y tolerancias que se sugieren.

Sondas de captación						
Prueba	Descripción	Importancia	Tipo y frecuencia	Materiales	Responsable	Tolerancia
Inspección general	Verificar equipo completo.	Esencial	Aceptación. Referencia: tras cambios.	Manuales de operación. Especificaciones técnicas.	Físico Médico	De acuerdo a indicado en el fabricante
Verificación						
de los montajes del detector y el colimador	Verificar los montajes del detector y del colimador.	Esencial	Aceptación. Constancia: diario	Sin materiales adicionales	Técnico	Funcionando
			Aceptación.			
Radiación de Fondo	Estimar el nivel de radiación de fondo en las condiciones de trabajo.	Esencial	Constancia: diario o inmediatamente antes del uso si no se utiliza diariamente.	Sin materiales adicionales	Técnico	Menor al 100% del fondo de referencia registrado.
Estabilidad de la capacidad de recuento	Comprobar la estabilidad en la capacidad de recuento	Esencial	Referencia: semestral. Constancia: diaria.	Fuente calibrada de ¹³⁷ Cs o de otro radionúclido de periodo de semidesintegración largo.	Técnico	La eficiencia de conteo no diferirá en más de 2 desviaciones del valor de referencia. La actividad de Cs-137 calculada no debe diferir más del 10%.
Precisión	Estimar la repetibilidad de las mediciones.	Esencial	Aceptación. Constancia: trimestral.	Fuente calibrada de ¹³⁷ Cs. o de otro radionúclido de periodo de semidesintegración largo.	Físico Médico	El valor de X2 (distribución chi-cuadrado) debe estar entre 3,32 y 16,92 (intervalo de confianza del 95%).
Linealidad con la tasa de cuentas o actividad	Estimar si la tasa de cuentas detectada es proporcional a la actividad emitida.	Esencial	Aceptación. Constancia: anual.	Fuente de actividad bien determinada del radionúclido del que se quiera conocer su respuesta.	Físico Médico	La desviación relativa entre cuentas obtenidas y esperadas debe ser menor que 5 %.
Resolución en energía	Estimar la precisión en la determinación de la energía y por consiguiente la menor diferencia de energía discernible.	Esencial	Aceptación. Referencia. Constancia: trimestral.	Fuente calibrada de ¹³⁷ Cs. o de otro radionúclido de periodo de semidesintegración largo.	Físico Médico	La resolución energética no debe superar en un 10 % la indicada por el fabricante.

Tabla 3-1 – Controles de la calidad de Sondas de captación.

Sondas Intraoperatoria

Prueba	Descripción	Importancia	Tipo y frecuencia	Materiales	Responsable	Tolerancia
Inspección general	Verificar equipo completo.	Esencial	Aceptación. Referencia: trascambios.	Manuales de operación. Especificaciones técnicas y contrato.	Físico Médico	De acuerdo a lo reportado por el fabricante
Fuente de alimentación	Verificar la fuente de alimentación y el porcentaje de carga de batería restante en el caso de los equipos a baterías.	Esencial	Aceptación. Constancia: diario o inmediatamente antes de cada uso del equipo si no se utiliza diariamente.	Sin material adicional	Físico Médico	De acuerdo a lo reportado por el fabricante. La autonomía de labatería debe estar dentro del rango especificado por el fabricante.
Fondo	Estimar la tasa de cuentas en ausencia de actividad	Esencial	Aceptación. Constancia: diario o inmediatamente antes de cada uso del equipo si no se utiliza diariamente. Constancia: anual	Sin materiales adicionales	Técnico Físico Médico	El valor del fondo de la tasa de conteo se hade mantener dentro de un rango de $\pm 10\%$ respecto del valor de referencia
Sensibilidad en aire, en medio dispersor.	Medir el número de cuentas detectadas por la fuente, en condiciones geométricas adecuadas, para una actividad conocida.	Esencial	Aceptación. Referencia: tras intervenciones que puedan afectar a la calibración del detector. Constancia: anual.	Fuente puntual del radionúclido de interés clínico. Soporte para colocación de la fuente en aire. Material dispersor. Dispositivos para conformar geometría.	Físico Médico	Aceptación: Sensibilidad $>95\%$ del especificado. Pruebas de constancia: 5% con el valor obtenido en referencia.
Resolución espacial y angular	Determinar la resolución espacial y angular.	Esencial	Aceptación. Referencia: tras intervenciones que puedan afectar a la	Fuente de ^{99m}Tc : 1.85–7.4 MBq (50–200nCi). Soporte para colocar la	Físico Médico	Resolución espacial < 25 mm para una
			calibración del detector, o mal funcionamiento. Constancia: anual.	fuente. Papel milimetrado.		distancia D de 30 mm. Para cabeza y cuello este requerimiento es aún < 15 mm. Resolución angular a FWHM $< 40^\circ$.

Señal acústica	Esta funcionalidad debe estar perfectamente controlada.	Esencial	Aceptación. Constancia: anual.	Fuentes de radionúclido de uso clínico ^{99m}Tc .	Físico Médico	La señal acústica debe posibilitar al usuario concentrarse en el campo operatorio.
Blindaje	Verificar el blindaje de las sondas que pueden mostrar algún área de pérdida.	Esencial	Aceptación. Constancia: anual.	Sin material adicional.	Físico Médico	De acuerdo a lo reportado por el fabricante.
Resolución energética	Estimar la precisión en la determinación de la energía y por consiguiente la menor diferencia de energía discernible.	Esencial	Aceptación. Referencia. Constancia: trimestral.	Fuente puntual de ^{57}Co o ^{99m}Tc	Físico Médico	De acuerdo a lo reportado por el fabricante.

Tabla 3-2 – Controles de la calidad de Sondas Intraoperatoria.

4. CONTADORES DE POZO

El contador de pozo utilizado en Medicina Nuclear permite detectar la presencia de radiación proporcionando la medición del número de cuentas detectadas.

Está constituido por un detector de centelleo. En él se aprovecha los destellos luminosos producidos durante la absorción de la radiación en ciertos sólidos. La interacción de los rayos gamma y X con los detectores de centelleo por efecto fotoeléctrico y/o Compton provocan altos estados de energía en las moléculas del detector.

A continuación, al retornar a su estado inicial emiten fotones de luz. El tiempo transcurrido hasta alcanzar el nivel de energía inicial se conoce como tiempo de decaimiento del centelleo. Esta luz se recoge y transforma en un pulso eléctrico que es registrado como una cuenta.

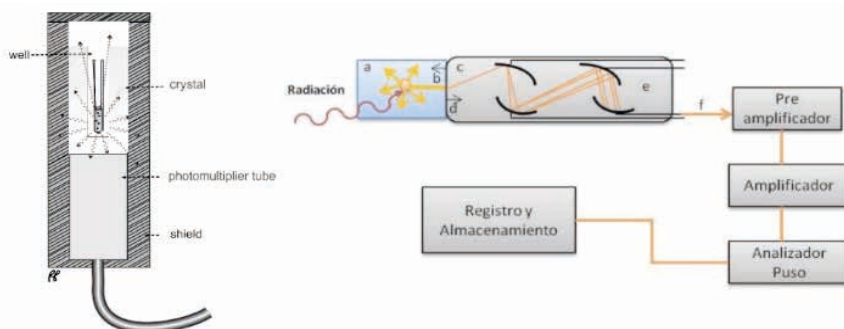


Figura 3 – (Izq). Esquema de un equipo contador de pozo. (Der) Diagrama de los componentes del pozo. (a) Cristal de Centelleo. (b) Contacto óptico. (c) Tubo Fotomultiplicador. (d) Fotocátodo. (e) Dinodos. (f) Señal de salida.

Fuente: Essential Nuclear Medicine Physics, Second Edition. Editor.

La Tabla 4-1 enlista las pruebas esenciales recomendables para el controlde la calidad de un contador de pozo, la frecuencia y tolerancias que se sugieren.

Contador de pozo						
Prueba	Descripción	Importancia	Tipo y frecuencia	Materiales	Responsable	Tolerancia
Inspección general	Verificar equipo completo.	Esencial	Aceptación. Referencia: tras cambios.	Manuales de operación. Especificaciones técnicas.	Físico Médico	Indicado por el fabricante
Prueba de ajuste del fotopico en el analizador	Verificar que elajuste del fotopico es el adecuado.	Esencial	Aceptación. Constancia: diaria.	Fuente radiactiva 370 kBq (10 μ Ci). Montaje para la fuente.	Físico Médico	Ajuste adecuado del fotopico en la ventana energética.
Sensibilidad	Verificar la sensibilidad de un sistema.	Esencial	Aceptación. Referencia. Constancia:	Fuente sellada de radiaciones y del ^{137}Cs .de 370	Físico Médico	De acuerdo a lo reportado por el fabricante.
			semanal.	kBq (10 μ Ci), calibrada. Montaje para la fuente. Papel con escalas lineales.		
Calibración de la energía	Efectuar y comprobar la calibración del sistema	Esencial	Aceptación. Referencia. Constancia: semanal.	Fuente sellada de radiaciones y del ^{137}Cs . de 370 kBq, calibrada. Montaje para la fuente.	Físico Médico	De acuerdo a lo reportado por el fabricante.
Resolución de la energía (% FWHM)	Verificar la FWHM para la radiación gamadel ^{137}Cs .	Esencial	Aceptación. Referencia. Constancia: semanal.	Fuente sellada de radiaciones gamma del ^{137}Cs ., 370 kBq (10 μ Ci), calibrada. Montaje para la fuente. Papel con escalas lineales.	Físico Médico	De acuerdo a lo reportado por el fabricante.
Precisión del conteo	Verificar la precisión del conteo.	Esencial	Aceptación. Referencia. Constancia: semestral.	Fuente sellada de radiaciones gamma del ^{137}Cs ., con unaactividad cercana a 370 kBq (10 μ Ci), calibrada.	Físico Médico	El valor de X2 debe estar entre 3,32 y 16,92 (intervalo de confianza del 95%)*

Linealidad de la respuesta a la energía	Verificar la linealidad de los valores del control de la base (umbral) del analizador de altura de pulsos.	Esencial	Aceptación. Referencia Constancia: semestral.	Fuentes radiactivas de radionúclidos γ , 3,7 MBq/ml. Tubos de ensayo. Pipetas. Papel con escalas lineales.	Físico Médico	De acuerdo a lo reportado por el fabricante
Tasa de conteo integral de fondo	Verificar la tasa de conteo de fondo.	Esencial	Aceptación. Referencia Constancia: semanal.	Sin materiales adicionales	Físico Médico	Menor al 20% del fondo de referencia registrado
Linealidad de la respuesta a la actividad	Verificar la linealidad de la tasa de conteo, en relación con la actividad del material radiactivo.	Esencial	Aceptación. Referencia Constancia: semestral.	Radionúclido de vida media física corta en solución de 18.5 MBq/ml (500 μ Ci/ml). Tubo de ensayo. Papel con escalas log-lineal.	Físico Médico	Pérdidas de tasa de conteos menores al 1%.
Condiciones preestablecidas en el analizador	Verificar las condiciones para la medición rutinaria de	Esencial	Aceptación. Anual.	Fuentes de 370 kBq/ml. Tubos de ensayo.	Físico Médico	De acuerdo a lo reportado por el fabricante.
	radionúclidos.			Pipetas y dispositivos para el pipeteo.		
Linealidad de la respuesta de la impresora	Verificar la linealidad de la respuesta de un inscriptor de gráficas.	Esencial	Aceptación. Referencia Constancia: semestral.	Fuente sellada de radiaciones gama del ^{137}Cs de 370 kBq. Papel con escalas lineales.	Físico Médico	De acuerdo a lo reportado por el fabricante.
Impresora	Verificación de la función.	Esencial	Aceptación. Constancia: diario	Sin materiales adicionales	Técnico	La impresora funciona correctamente
Verificación de los montajes del detector y el colimador	Verificar los montajes del detector y del colimador.	Esencial	Aceptación. Constancia: diario	Sin materiales adicionales	Técnico	Funcionando
Sensibilidad de los detectores	Igualar las sensibilidades de los detectores individuales.	Esencial	Aceptación. Referencia Constancia: diario.	Fuente radiactiva de 370 kBq. Montaje para la fuente radioactiva.	Físico Médico	Tasa de conteo menor al 4% con respecto a la calibración

Tabla 4-1 – Controles de calidad Contador de pozo.

5. CONTROL DE LA CALIDAD CÁMARA GAMMA PLANARES

La cámara gamma es un instrumento que se utiliza para obtener imágenes de la distribución espacial de un radiofármaco. Los principales componentes son: el detector; la camilla; el gantry o estativo; la computadora o estación de adquisición. El detector es el

encargado de la detección y conversión de los fotones gamma provenientes del paciente a fotones de luz y estos a su vez son convertidos en pulsos de corriente. Los detectores presentan, desde su cara externa hacia el interior, el colimador, el cristal de centelleo, una red de tubos fotomultiplicadores (TFM), preamplificadores, amplificadores, analizador de altura de pulsos y circuitos de posicionamiento. El colimador suele consistir en una placa de plomo que contiene un gran número de agujeros para que solo penetren los fotones que inciden perpendicularmente al mismo, de esta forma se forma una imagen proyectada de la distribución de los fotones en la superficie del cristal. Las señales de los TFM alimentan a los circuitos lógicos de posición electrónicos o digitales que determinan la ubicación X-Y de cada evento de centelleo a medición que se produce, mediante la media ponderada de las señales de los tubos PM.

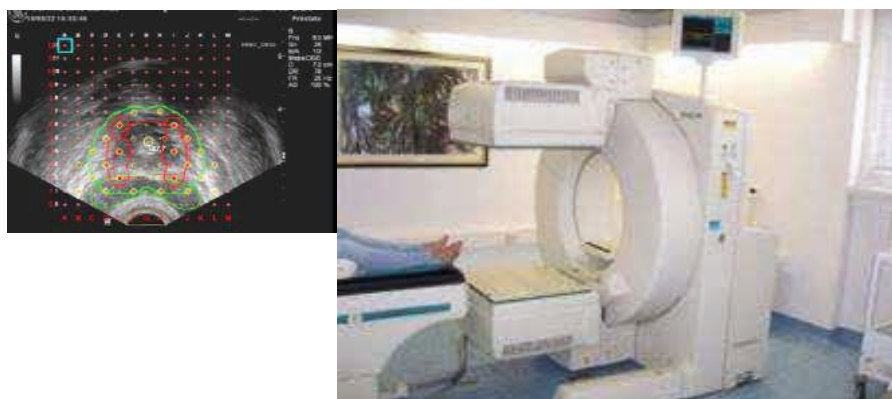


Figura 4 – (a) Principios básicos y componentes de una cámara gamma moderna. (b) Cámara gamma con 2 detectores.

Fuente: Physics in Nuclear Medicine

La Tabla 5-1 enlista las pruebas esenciales recomendables para el control de la calidad de una cámara gamma planar, las frecuencias y tolerancias que se sugieren. Además se presentan las pruebas de cámara gamma de cuerpo entero.

Es importante remarcar que se distinguen entre dos tipos de parámetros: los intrínsecos y los extrínsecos o de sistema completo, entendiéndose por estos a los que se utilizan para las pruebas que se realizan sin colimador y con colimador, respectivamente.

SPECT y Cámara Gamma. Pruebas planares

Prueba	Descripción	Importancia	Tipo y frecuencia	Materiales	Responsable	Tolerancia
Inspección general	Verificación de la integridad de los equipos.	Esencial	Aceptación. Referencia: traspasos.	Manuales de operación. Especificaciones técnicas.	Físico Médico	De acuerdo a lo reportado por el fabricante.
Fondo	Verificar la tasa de conteo de fondo de en las condiciones usuales en la rutina clínica y con un radionúclido en particular	Esencial	Constancia: diario	Sin materiales adicionales	Técnico Físico Médico	El valor del fondo de la tasa de conteo se debe mantener dentro de un rango de $\pm 20\%$ respecto del valor de referencia
Verificación de la ventana energética	Verificar para todos los fotopicos empleados en la práctica clínica que están correctamente centrados en la ventana de energía preestablecida.	Esencial	Constancia: diario	Fuente puntual de ^{99m}Tc . Otro radionúclido empleado en la práctica clínica.	Técnico Físico Médico	El fotopico se encuentra correctamente centrado en la ventana energética establecida.
Resolución energética intrínseca	Indica la capacidad de diferenciar fotones de distinta energía.	Esencial	Aceptación. Constancia: semestral.	Fuente puntual de ^{99m}Tc .	Físico Médico	Prueba de aceptación y constancia: $\pm 5\%$. Desviación del valor de la energía de pico $< 3\%$.
Registro espacial de ventana múltiple	Verificar que las imágenes de un mismo objeto adquiridas con diferentes ventanas de energía se superponen.	Esencial	Aceptación. Constancia: semestral.	2 fuentes colimadas de un radionúclido emisor de diferentes energías que no superen 10 kcps. Se utilizará una fuente colimada según el maniquí descrito en el documento NEMA NU1 Standard 2007.	Físico Médico	Prueba de aceptación: el máximo valor obtenido de desplazamiento $\pm 10\%$ de lo especificado por el fabricante. Prueba de constancia: 20% del valor de referencia.

Uniformidad intrínseca	Se debe comprobar que este está en buen estado para garantizarla buena respuesta clínica del equipo.	Esencial	Aceptación. Constancia: mensual. Diario como alternativa al chequeo de Uniformidad extrínseco.	Fuente puntual de ^{99m}Tc . o ^{57}Co .	Técnico Físico Médico	Valores de UI y UD no deben superar el peor valor reportado por el fabricante. Análisis visual, para apreciar mejor los defectos de uniformidad.
Uniformidad extrínseca	Mide la uniformidad en condiciones de trabajo habitual, es decir, con los colimadores en uso.	Esencial	Constancia: Diaria.	Fuente plana de ^{57}Co o Fuente planarrellenable de ^{99m}Tc	Físico Médico	Valores de UI y UD no deben superar el peor valor reportado por el fabricante. Análisis visual, para apreciar mejor los defectos de uniformidad.
Resolución espacial extrínseca	Estima la capacidad del equipo de distinguir entre dos fuentes radiactivas pequeñas y cercanas.	Esencial	Aceptación para cada combinación colimador-radionúclido. Constancia: mensual para el colimador de uso más frecuente.	Fuente lineal (menos de 1 mm de espesor y más de 30 mm de longitud) de los distintos radionúclidos de referencia para cada colimador.	Físico Médico	Valores obtenidos menores o iguales que los que el fabricante.
Linealidad intrínseca	Es una medición de la exactitud del cálculo de las coordenadas.	Esencial	Aceptación. Constancia: anual. Tras cambios.	Fuente puntual de ^{99m}Tc . Maniquí NEMA para resolución-linealidad intrínseca.	Físico Médico	Valores obtenidos menores o iguales que los que el fabricante.
Tamaño de pixel	Se obtiene el factor de escala entre las dimensiones del objeto y de su imagen.	Esencial	Aceptación. Constancia: semestral (para el colimador utilizado habitualmente). Tras reparaciones.	Fuente puntual de unos 2.8-3.7 MBq (~ 75 -100 nCi) de ^{99m}Tc . Regla o papel milimetrado.	Físico Médico	El tamaño de pixel medido en la dirección X no debe diferir en más del 5 % en la dirección Y.
Sensibilidad planar	Determina el número de cuentas que es capaz de detectar el equipo por unidad de actividad. Está relacionado con la eficiencia del mismo.	Esencial	Aceptación (para todos los colimadores) Constancia: mensual (para el colimador empleado habitualmente). Tras intervenciones que puedan afectar a la calibración del detector.	Fuente radiactiva depositada sobre una gasa o papel secante dentro de una cápsula de Petri o maniquí equivalente, ambos con un diámetro mayor de 15 cm.	Físico Médico	Se comparará el valor obtenido con el especificado por el fabricante. El valor obtenido para cada colimador debe ser mayor al 80 % del especificado por el fabricante.

Tasa máxima de recuento	Sirve para medir la variación de la tasa de cuentas que es capaz de detectar una cámara gamma conforme aumenta la tasa incidente.	Esencial	Aceptación. Referencia: trascambios.	Modo intrínseco en aire o extrínseco con dispersión: Fuente de 10 ml de ^{99m}Tc de una actividad tal que genere una tasa incidente mayor que la tasa que produce el máximo en la curva de tasa de cuentas observada.	Físico Médico	Los valores deben cumplir lo afirmado en las especificaciones del fabricante.
Sincronismo	Determinar el tiempo de retardo entre la orden de adquisición y la propia adquisición.	Esencial	Aceptación Referencia: trascambios	Fuente puntual de ^{99m}Tc de una actividad de 1.1 MBq (30 nCi).	Físico Médico	Tiempo aparente de adquisición dinámica \leq Tiempo de adquisición
	adquisición.					dinámica.

Tabla 5-1 – Controles de la calidad Equipos SPECT y Cámara Gamma. Pruebas planares.

SPECT y Cámara Gamma. Pruebas planares. Pruebas de cuerpo entero						
Prueba	Descripción	Importancia	Tipo y frecuencia	Materiales	Responsable	Tolerancia
Alineamiento de dos barridos	Verificar la alineación de las imágenes decada barrido	Esencial	Aceptación. Constancia: semestral.	Fuente de actividad uniforme de dimensiones iguales o superiores a su campo de visión.	Físico Médico	Desalineamiento entre los bordes de las imágenes de cada barrido < 5%
Resolución espacial encuerpo enteros	Estimar la resolución espacial cuando existe movimiento relativo entre paciente y detector.	Esencial	Aceptación. Constancia: anual.	Fuente puntual de ^{99m}Tc de una actividad tal que no sobrepase las 25 kcps. El volumen será lo más pequeño posible, aproximadamente 0,1 ml.	Físico Médico	Se admite una diferencia de 1 % respecto de los valores obtenidos en prueba estática en idénticas condiciones.
Uniformidad del sistema de cuerpo entero	Evaluar la uniformidad de detección del sistema de cuerpo entero en todo el campo de visión del estudio.	Esencial	Aceptación. Constancia: semestral.	Fuente de actividad uniforme de dimensiones iguales o superiores a su campo de visión, cuya actividad produzca una velocidad de conteos entre 10-20Kc/s.	Físico Médico	El CV del número de cuentas por imagen debe ser menor al 2%. La imagen de uniformidad no debe presentar zonas frías o calientes dentro del campo útil de visión.

Variaciones en la velocidad de movimiento. Dimensiones de la Imagen. Correcciones de los tiempos de exposición en sistemas no rectangulares.	Evaluar si existen variaciones en estos parámetros	Esencial	Aceptación. Constancia: anual. Cuando se realicen reparaciones o ajustes importantes en el sistema.	Físico Médico	Diferencias entre mínimo y máximo en el perfil de cuentas (en eje X) menor al 20%. Las imágenes no deben mostrar no-uniformidades y la longitud debe coincidir con la reportada por el fabricante.
--	--	----------	---	---------------	--

6. CONTROL DE LA CALIDAD CÁMARAS GAMMA TOMOGRÁFICAS O SPECT

Para adquirir un estudio de tomografía por emisión de fotón único (SPECT), se hace rotar una cámara gamma convencional alrededor del paciente, registrando una imagen en cada paso angular. Mediante algoritmos de reconstrucción tomográfica similares a los utilizados en CT se pueden obtener conjuntos de datos 3D que permite ilustrar la biodistribución del trazador en planos ortogonales.

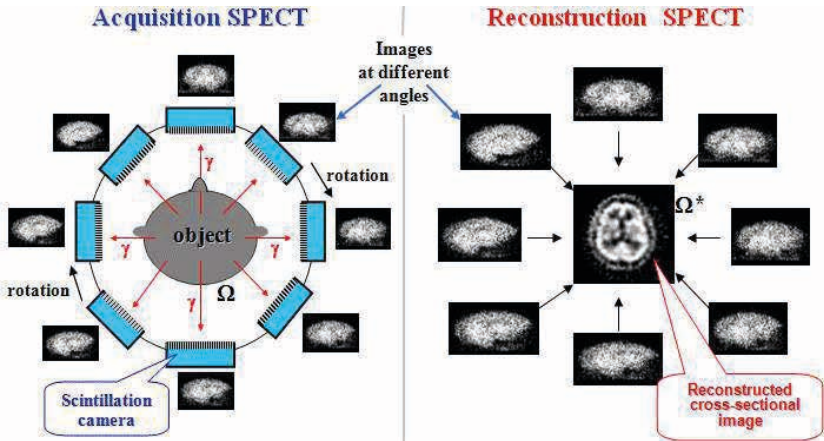


Figura 4 – Funcionamiento SPECT.

Fuente: <https://astronuclphysics.info/Scintigrafie.htm>



Figura 5 – SPECT Intevo (Siemens).

Las imágenes logradas mediante el SPECT tienen un número de ventajas potenciales con respecto a la imagen plana de la medicina nuclear convencional. Sin embargo, requieren una atención especial, pues para obtener resultados adecuados en los sistemas de SPECT se debe tener cuidado en la puesta a punto y en el funcionamiento de la cámara de centelleo y de las otras partes que componen el sistema. Existen además ciertos requerimientos adicionales para los sistemas con cabeza doble (o múltiple).

La Tabla 6-1 enlista las pruebas esenciales recomendables para el control de la calidad de SPECT, las frecuencias y tolerancias que se sugieren.

Equipos SPECT. Pruebas tomográficas						
Prueba	Descripción	Importancia	Tipo y frecuencia	Materiales	Responsable	Tolerancia
Inspección física y mecánica del sistema.	Verificación de la integridad de los equipos y de la correspondencia entre lo recibido y lo adquirido.	Esencial	Aceptación Diario.	Manuales de operación. Oferta, contrato y especificaciones técnicas de compra. Planos de la instalación.	Físico Médico	De acuerdo a lo reportado por el fabricante.
Centro de rotación y alineamiento	Comprobar que el centro de rotación se mantiene constante durante la rotación y que no varía según se determine en distintos puntos del campo de visión, es decir, su independencia respecto al eje Y.	Esencial	Referencia. Constancia: mensual.	1-5 fuentes puntuales de 37 MBq (05,-1 mCi) de Tc99m. Maniquí MHR-COR.	Físico Médico	El corrimiento del centro de rotación debe ser menor a 2 mm.

Uniformidad tomográfica	Determinar la uniformidad de la reconstrucción de un maniquí con una distribución homogénea de actividad.	Esencial	Aceptación. Constancia: mensual.	Maniquí cilíndrico de 20 cm de diámetro y longitud mínima 20 cm. 740- 1110 MBq (20-30 mCi) de Tc99m disueltos homogéneamente en agua. Es imprescindible asegurarse de que la mezcla sea homogénea.	Físico Médico	El contraste medido entre cualquier artefacto de anillo y el fondo uniforme por medio de un perfil no debe exceder el 10%. Diferencia entre el valor central y el borde debe ser menor al 10%.
Resolución espacial tomográfica en aire (sin dispersor)	Determinar la resolución espacial en la reconstrucción tomográfica.	Esencial	Aceptación. Referencia. Constancia: anual.	3 fuentes puntuales de ^{99m}Tc .	Físico Médico	Diferencia entre la resolución planar y la tomográfica < 2 mm. Mediciones de la resolución espacial planar y tomográfica no deben diferir en más de un 10%.
Resolución tomográfica con medio dispersor	Determinar la resolución espacial en la reconstrucción tomográfica, con medio dispersor	Esencial	Aceptación. Constancia: semestral.	3 fuentes puntuales de ^{99m}Tc . Medio dispersor.	Físico Médico	Debe conservar los mismos valores de referencia.
Prueba de variaciones de sensibilidad y uniformidad con el ángulo	Determinar las variaciones de la sensibilidad del sistema en función de la posición angular del detector.	Esencial	Aceptación. Referencia. Constancia: Anual.	Fuente plana de ^{57}Co o Fuente plana rellenable de ^{99m}Tc .	Físico Médico	La sensibilidad no debe variar más de un 1% del valor medio.
Funcionamiento total	Verificar que el sistema esté funcionando correctamente en condiciones similares a las utilizadas en la práctica clínica. Estimar el contraste de objetos de tamaño conocido.	Esencial	Aceptación. Referencia. Constancia: Anual.	Un fantoma de desempeño total, por ejemplo Jaszczak, Carlson. 370MBq de actividad de ^{99m}Tc .	Físico Médico	Los parámetros de funcionamiento deben coincidir con la referencia inicial.

Tabla 6-1 – Controles de calidad SPECT.

7. CONTROL DE LA CALIDAD DE PET

La Tomografía por emisión de Positrones (PET) utiliza un tipo de radionúclido que sufre decaimiento beta+ (positrones). Estos últimos cuando pierden su energía cinética durante su recorrido interactúan con los electrones presentes en los órganos y tejidos, produciendo una aniquilación positrón-electrón, de la cual salen dos fotones en dirección opuesta, con energía de 511 keV cada uno.

La detección por el PET de esos dos fotones involucra dos detectores situados opuestamente que deben registrar ambos eventos con una diferencia temporal muy pequeña llamada ventana de tiempo de coincidencia. Como los dos fotones viajan en direcciones opuestas, en un ángulo cercano a 180°, el punto de aniquilación estará ubicado sobre una línea recta llamada línea de respuesta (LOR) que une ambos puntos de detección. Es lo que se conoce como colimación electrónica en PET. Por lo tanto, a diferencia de los sistemas SPECT, no es necesario la presencia de un colimador convencional.

Por esa razón, la sensibilidad en PET es mayor, ya que la detección no se limita solamente a los fotones que viajan perpendicularmente al detector.

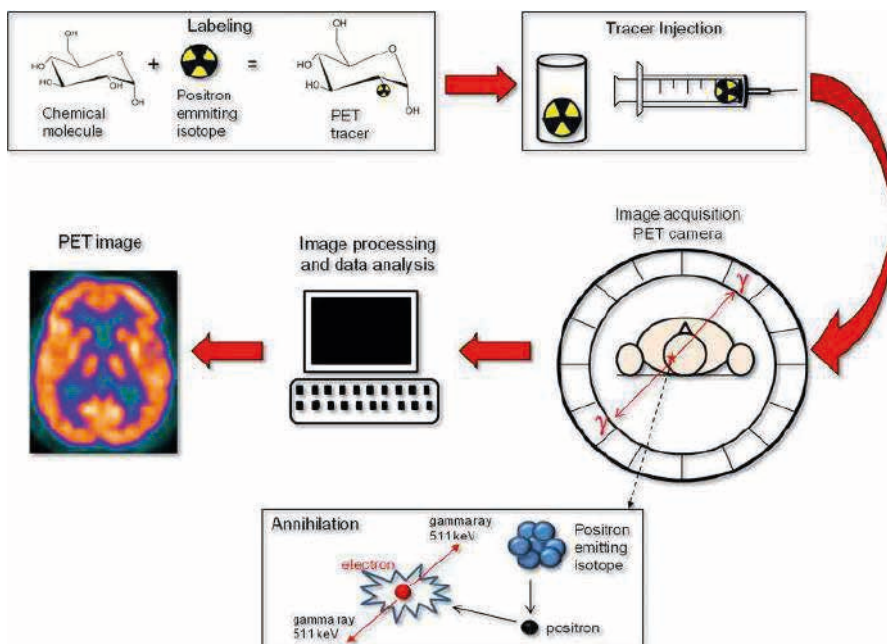


Figura 6 – Funcionamiento del PET.

Fuente: <https://www.researchgate.net/profile/ Cartoon-showing-the-basic-principles-and-procedures-in-PET-imaging.png>.



Figura 7 – PET (Philips).

Fuente: Physics in Nuclear Medicine.

La Tabla 7-1 enlista las pruebas esenciales recomendables para el control de la calidad del PET, las frecuencias y tolerancias que se sugieren.

PET						
Prueba	Descripción	Importancia	Tipo y frecuencia	Materiales	Responsables	Tolerancia
Inspección general	Consiste en la verificación de la integridad del equipo.	Esencial	Aceptación. Referencia: tras cambios.	Manuales de operación. Oferta, contrato y especificaciones técnicas.	Físico Médico	De acuerdo a lo reportado por el fabricante.
Estabilidad diaria	Evaluar, mediante una adquisición rutinaria y rápida, la constancia del funcionamiento del sistema de detectores y detectar cualquier cambio repentino.	Esencial	Aceptación. Constancia: diaria.	Dependiendo del sistema, fabricante y modo de adquisición (2D, 3D) se utilizarán fuentes radiactivas de geometría y actividad apropiadas al sistema, como: ^{68}Ge , ^{22}Na o ^{137}Cs .	Físico Médico	Las establecidas por el fabricante.
Resolución espacial	Determinar la distancia a la que deben situarse dos	Esencial	Aceptación. Referencia. Constancia: anual.	3 fuentes puntuales de ^{18}F , de diámetro	Físico Médico	Los valores de FWHM y FWTM no deben ser

	<p>fuentes puntuales para que se resuelvan en la imagen.</p> <p>Se trata de caracterizar la anchura de la imagen reconstruida de una fuente puntual (PSF) mediante la medición de FWHM y FWTM. Con esta medición se verifica que la resolución tomográfica del sistema no se ha degradado en el tiempo en los procesos de adquisición o reconstrucción.</p>			<p>inferior a 1 mm en las direcciones axial y transaxial, ubicadas dentro de un capilar de vidrio con diámetro interno menor o igual a 1 mm y externo menor o igual a 2 mm.</p> <p>La concentración de actividad inicial debería de ser ~1000 MBq/ml. Las fuentes se suspenderán en aire.</p>		<p>peores que los especificados por el fabricante.</p> <p>Si este no especifica los FWTM, se debe verificar que: $FWTM_{medido} / FWHM_{medido}$ entre 1.8 y 2.0.</p> <p>Establecidos los valores de referencia, la tolerancia para la resolución espacial es: $FWHM_{medido} < 1.05 FWHM_{esperado}$.</p>
Sensibilidad	<p>Determinar la tasa de sucesos verdaderos por unidad de concentración de la actividad con un maniquí cilíndrico de dimensiones conocidas.</p>	Esencial	<p>Aceptación. Referencia. Constancia: anual.</p>	<p>Fuente lineal de 700 mm de longitud rellena de forma uniforme con ^{18}F. 5 manguitos o fundas de Al de 700 mm de longitud, con espesor 1.25 mm y diámetros crecientes para contener la fuente y el resto de los manguitos de menor diámetro.</p>	Físico Médico	<p>El valor de la sensibilidad no debe ser peor que el especificado por el fabricante.</p> <p>Establecidos los valores de referencia, la tolerancia para la sensibilidad total es: $Stotal, medición > 0,95 Stotal, esperada$.</p>
Medición de la fracción de dispersión, depéridas y aleatorios.	<p>Evaluación de la dispersión de fotones, pérdidas de la tasa de recuento y los sucesos aleatorios (randoms).</p> <p>La dispersión y los sucesos aleatorios introducen sucesos no válidos que afectan a la calidad de imagen y a la cuantificación.</p>	Esencial	<p>Aceptación. Referencia. Constancia: anual.</p>	<p>Maniquí de dispersión (Nema).</p> <p>Se utiliza una concentración de ^{18}F cuya actividad inicial la recomienda el fabricante para que se pueda medir adecuadamente el pico NEC (Noise Equivalent Count rate, Tasa de recuento equivalente al ruido).</p>	Físico Médico	<p>Los valores de la fracción de dispersión, del pico NEC y de la concentración del pico NEC no deben ser peores que los especificados por el fabricante.</p> <p>Establecidos los valores de referencia, la tolerancia para la fracción de dispersión es: $SF_{medición} < 1.05 SF_{esperada}$.</p>

Exactitud de las correcciones de sucesos aleatorios y pérdidas de sucesos.	Valorar la exactitud de las correcciones que el sistema aplica a los datos adquiridos.	Esencial	Aceptación Referencia Constancia: anual	Maniquí de dispersión (Nema). Se utiliza una concentración de ^{18}F cuya actividad inicial la recomienda el fabricante para que se pueda medir adecuadamente el pico NEC.	Físico Médico	El valor de la desviación relativa de conteo no debe ser peor que el especificado por el fabricante. La tolerancia para la desviación relativa de conteo es: $\text{ER}_{\text{medido}} < 1.05 \text{ ER}_{\text{esperado}}$.
Calidad de la imagen. Precisión de correcciones de atenuación y dispersión y de la cuantificación.	Evaluar la calidad de imagen usando un maniquí con lesiones frías y calientes para simular los estudios clínicos. Este test también permite calcular las correcciones de atenuación y de dispersión, así como cuantificar las mediciones absolutas de actividad en un volumen de interés.	Esencial	Aceptación. Referencia. Constancia: anual.	Maniquí de calidad de imagen. Maniquí de dispersión (Nema, 2007). El maniquí de cuerpo se rellena con una concentración de 5.3 kBq/ml de ^{18}F , distribuidos en 70 litros. Las 2 esferas mayores con agua para simular lesiones frías y las 4 pequeñas se rellenan con una concentración de ^{18}F tal que el cociente de concentraciones esferas-fondosea de 4:1 y 8:1. La fuente lineal de dispersión se rellena con 116MBq de ^{18}F .	Físico Médico	La tolerancia respecto a los valores de referencia se considerará del 5 %.
Resolución en energía	Comprobar el funcionamiento de fotomultiplicador es y asegurar la eficiencia de la recogida de la luz está dentro de las especificaciones del fabricante.	Esencial	Aceptación. Constancia: anual.	Fuente puntual de ^{18}F con diámetro inferior a 1 mm (en las direcciones axial y transversal) en el seno de un tubo capilar con diámetro interno menor que 1 mm y externo menor que 2 mm	Físico Médico	Establecido el valor de referencia, la tolerancia para la resolución energética es: $\text{RE}_{\text{esperado}} < 1.05 \text{ RE}_{\text{medido}}$.
Resolución temporal para PET con TOF (Tiempo de vuelo)	Determinar la capacidad del sistema para calcular la diferencia en el tiempo de llegada de los dos fotones de coincidencia, y por lo tanto, obtener información sobre la ubicación probable de la aniquilación a lo largo de la LOR.	Esencial	Aceptación. Constancia: diaria.	Fuente puntual de periodo de semidesintegración largo, como ^{22}Na o la recomendada por el fabricante. La fuente se coloca exactamente en el centro del campo de visión	Físico Médico	Establecido el valor de referencia, la tolerancia para la resolución temporal es: $\text{RT}_{\text{medido}} < 1.05 \text{ RT}_{\text{esperado}}$

Calidad de imagen	Comprobar la constancia de los parámetros de calidad de imagen: uniformidad, resolución espacial y concentración, utilizando un maniquí	Esencial	Aceptación. Constancia: anual.	Maniquí de Jaszczak que consiste en un cilindro rellenable (20 cm de diámetro y 20 cm de longitud) con objetos esféricos sólidos y patrones de barras de diferentes diámetros	Físico Médico	No deberían variar significativamente de los valores de referencia
Normalización	El uso de datos incorrectos de normalización compromete la calidad de la imagen.	Esencial (En algunos sistemas se realiza en el control diario)	Aceptación. Constancia: según fabricante y tras reparación del detector.	Dependiendo del sistema, fabricante y modo de adquisición 2D- 3D, el procedimiento de normalización se puede realizar utilizando diferentes maniquíes y fuentes: Fuente lineal de ^{68}Ge . Maniquí cilíndrico	Físico Médico	No detectar artefactos en los sinogramas.
				uniforme de ^{68}Ge . Fuente puntual de ^{137}Cs .		
Calibración de la concentración	Asignar unos factores que convierten sucesos reconstruidos a actividad en la imagen. Estos factores, correlacionan los valores de los píxeles en cada imagen con la actividad específica medición; factores de calibración inexactos producen errores de cuantificación de las imágenes.	Esencial	Aceptación Constancia: trimestral	Maniquí rellenable con ^{18}F .	Físico Médico	Desviaciones superiores al 10 % de los resultados esperados deben dar lugar a la adopción de mediciones correctivas. Una inspección visual no debería detectar artefactos o franjas de mayor/ menor actividad.

8. EQUIPOS HÍBRIDOS: PET/CT Y SPECT/CT

Estos sistemas híbridos de obtención de imágenes son capaces de adquirir imágenes de PET o SPECT, junto con imágenes de CT en rápida sucesión, por lo que se puede considerar que los datos tienen un registro espacial y temporal bastante bueno.

Las CT no sólo proporcionan un contexto anatómico para mejorar la interpretación diagnóstica de los estudios de medicina nuclear, sino que también pueden utilizarse como base para realizar correcciones para la atenuación y la dispersión de fotones en la PET y SPECT.

Con respecto a equipos híbridos como PET-RMN (fusión de PET con Resonancia Magnética Nuclear) quedan fuera del alcance de ese documento.



Figura 8 – (a) PET-CT Biograph (Siemens) (b) SPECT CT Symbia Intevo (Siemens).

La Tabla 8-1 enlista las pruebas esenciales recomendables para el controlde la calidad de equipos híbridos, las frecuencias y tolerancias que se sugieren.

PET						
Prueba	Descripción	Importancia	Tipo y frecuencia	Materiales	Responsable	Tolerancia
Alineación deláseres	Garantizar que los láseres internos y externos están correctamente alineados. Esta prueba es importante si las imágenes están siendo utilizadas para la planificación del tratamiento de radioterapia.	Esencial	Aceptación. Constancia: diario y mensual.	Maniquí con marcas de alineación.	Técnico Físico Médico	El valor de la desviación de la alineación debe ser inferior en valor absoluto a 2 mm.
Registro de imágenes	Evaluar la exactitud del registro de las imágenes obtenidas con los equipos híbridos SPECT-CT y PET-CT.	Esencial	Aceptación Constancia: trimestral	En general el fabricante incluye en el equipamiento decontrol de calidad suministrado un maniquí para el registro de imágenes.	Físico Médico	Registro inferior a ± 1 píxel (0 ± 1 mm, el que sea menor) cuando se utiliza una matriz de 512×512 .

Tabla 8-1 – Controles de calidad equipos híbridos.

9. PUNTOS CLAVES

1. El éxito de la medicina nuclear depende, en gran parte, del correcto funcionamiento de todos y cada uno de los sofisticados equipos que se utilizan en la medición de la actividad de los radionúclidos.
2. Para garantizar el principio de optimización de las exposiciones médicas en medicina nuclear, se requiere la implementación del Manual de Normas de Controles de Calidad, redactando los procesos, procedimientos e instrucciones.
3. Es fundamental realizar controles sistemáticos para garantizar la calidad de las imágenes, la seguridad de los pacientes y del personal de operación.
4. La confiabilidad de las dosis de radiofármacos administradas a los pacientes depende del desempeño del calibrador de dosis (activímetro). Un programa de garantía de calidad aceptable para los calibradores consiste en una serie de procedimientos que miden su exactitud, estabilidad, precisión y linealidad.
5. Para el caso de monitoreo in vivo de la glándula tiroides son usados los sistemas de sonda de captación con cristal de NaI (TI), por lo tanto, es importante verificar constantemente su funcionamiento, llevando a cabo los controles mencionados.
6. El contador de pozo utilizado en Medicina Nuclear es un detector de centelleo que requiere de controles para su correcto funcionamiento.
7. Las sondas intraoperatorias requieren de controles simples, expresivos y reproducibles.
8. Evidentemente en todos estos equipos (cámara gamma, SPECT, PET y equipos híbridos) se deben efectuar las pruebas de control de calidad que aseguren un comportamiento estable, así como la adecuación a las especificaciones del fabricante. Siempre se recomienda tomar como guía de estas pruebas las definidas en protocolos internacionales si es que en el país no existen Normas nacionales al respecto.
9. Los equipos híbridos como PET-RMN, no se mencionan debido a que están fuera del alcance del documento.

REFERENCIAS

AAPM. The Selection, Use, Calibration and Quality Control of Radionuclides Calibrators used in Nuclear Medicine. AAPM Report no. 181. Alexandria, EEUU: American Association of Physicists in Medicine; 2012.

CIEMAT, SEFM, SEMN, SEPR, SERFA. Protocolo para la calibración y el uso de activímetros. Laboratorio de Metrología de Radiaciones Ionizantes CIEMAT, Sociedad Española de Física Médica, Sociedad Española de Medicina Nuclear, Sociedad Española de Protección Radiológica, Sociedad Española de Radiofarmacia; 2003.

IAEA. Quality control of nuclear medicine instruments. IAEA-TECDOC-602. Viena, Austria: International Atomic Energy Agency; 1991.

IEC. Nuclear medicine instrumentation - Radionuclide calibrators. IEC-TR61948-4. Ginebra, Suiza: International Electrotechnical Commission; 2006.

NPL. Protocol for Establishing and Maintaining the Calibration of Medical Radionuclide Calibrators and their Quality Control. A National Measurement Good Practice Guide n° 93. Teddington, Middlesex, Reino Unido: National Physics Laboratory; 2006.

SEFM, SEMN, SEPR. Protocolo de Control de calidad de la instrumentación de Medicina Nuclear. 2020

OIEA 2009. IAEA HUMAN HEALTH SERIES No. 6 Quality assurance for SPECT systems. VIENNA: International Atomic Energy Agency.

AAPM 2019, James R. Halama, C. D. Acceptance Testing and Annual Physics Survey Recommendations for Gamma Camera, SPECT, and SPECT/CT Systems. The Report of AAPM Task Group 177. American Association of Physicists in Medicine.

OIEA 2009. IAEA HUMAN HEALTH SERIES No. 1 Quality assurance for pet and pet/ct systems. VIENNA: International Atomic Energy Agency.

OIEA 2006. Technical Reports Series No. 454 Quality assurance for radioactivity measurement in nuclear medicine. VIENNA: International Atomic Energy Agency

WHO. Quality Assurance in Nuclear Medicine. Ginebra, Suiza: World Health Organization; 1982.

Zanzonico P. Routine Quality Control of Clinical Nuclear Medicine Instrumentation: A Brief Review. J Nucl Med. 2008 Jul; 49(7).

SIMON, R. Cherry, PhD., JAMES A. Sorenson, PhD., MICHAEL, E. Phelps., PhD. Physics in Nuclear Medicine. Fourth Edition. 2012.

Videos tutoriales sobre las pruebas de control de calidad de los sistemas SPECT. https://humanhealth.iaea.org/HHW/MedicalPhysics/e-learning/Tutorial_videos_on_Quality_Control_tests_for_SPECT_systems/index.html