

ACTUALIZACIÓN DEL PATRÓN NACIONAL EN LA MAGNITUD ACTIVIDAD NUCLEAR.

Luis Herrera V., Olga C. García. D.

Laboratorio de Patrones Radiactivos del Departamento de Metrología de Radiaciones Ionizantes, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares del ININ.

Tel. (55) 53 297255 y Fax. 55 53 29 73 00, ext. 3837. luis.hrrr6@gmail.com,
olga.garcia@inin.gob.mx.

Resumen.

El Laboratorio de Patrones Radiactivos del Departamento Metrología de Radiación Ionizante del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, es un laboratorio designado y sede del Patrón Nacional en la magnitud de Actividad Nuclear desde 1997. El LPR para la implementación del patrón tiene un sistema de espectrometría de radiación gamma con detectores semiconductores de germanio hiperpuro (Ge Hp), y sus respectivos módulos electrónicos analógicos y digitales.

En Abril del 2005 se inició una actualización de los implementos de medición tales como procedimientos, software, módulos del espectrómetro y de la infraestructura. Para lograrlo: 1) Se tomaron acciones para mejorar la resolución en energía y la estabilidad del sistema, 2) Se reemplazaron componentes obsoletos, 3) Se automatizó el registro y proceso de datos, se mejoró el despliegue de registros de salida. 4) Se hizo introducción de prácticas recomendadas por la NMX-EC- 17025-IMNC-2006 y por Garantía de Calidad.

Se describe el desarrollo de estos cambios en el laboratorio, algunos aún en proceso, se indican problemas surgidos y alternativas de solución con sus resultados; como el impacto en los valores de eficiencia obtenidos del detector. Se discuten las perspectivas de mejora y diferencias que estos cambios podrían significar.

Los cambios realizados en los implementos, la instrumentación y los procedimientos. Produjeron poca variación en la eficiencia del espectrómetro, durante el período de 2002 al 2009.

1. INTRODUCCIÓN.

El Laboratorio de Patrones Radiactivos del Departamento Metrología de Radiación Ionizante del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares es un laboratorio designado y sede del Patrón Nacional en la magnitud Actividad Nuclear desde 1997^[1]. Se encuentra en el Centro Nuclear "Nabor Carrillo Flores" del ININ. En zona montañosa a 2957 m SNM. El patrón hace uso de un espectrómetro gamma para evaluar la actividad de muestras radiactivas, las cuales tienen diferentes formas y geometrías. Aquí sólo nos referimos a fuentes puntuales (radio <0.3cm).

Es una Instalación con capacidad de elaborar fuentes radiactivas y calibrar su actividad nuclear (número de partículas nucleares emitidas por unidad de tiempo, en Becquerel [s^{-1}]).

El patrón de actividad designado es un sistema de espectrometría de radiación gamma, que consiste de un detector tipo semiconductor de germanio hiperpuro (GeHp) y de módulos electrónicos analógicos y digitales interconectados como se muestra en las figuras 1 y 2.

En principio, cada uno de estos módulos de tratamiento y acondicionamiento de señal del transductor (GeHp), tendrían una función de mejora a la relación ruido señal, amplificación, selectividad, resolución y estabilidad. Pero con probabilidad de aumento de fallas, ruido, retardo, saturación, e inestabilidad de funcionamiento.

El principio de funcionamiento del detector consiste en formar pulsos, a partir de la carga eléctrica recolectada, durante eventos de ionización, producidos por los cuantos de radiación emitidos por una muestra radiactiva, al interaccionar con un cristal semiconductor de Germanio ultra puro, polarizado a alto voltaje^[2] (figura 3).



Fig. 1. Sistema de espectrometría gamma, usado como Patrón Nacional de Actividad. Se indican: 1. Detector, 2. Fuente de alimentación, 3. Amplificador, Convertidor Analógico Digital, Analizador Multicanal, 4. Computador. 5. Monitor de video.

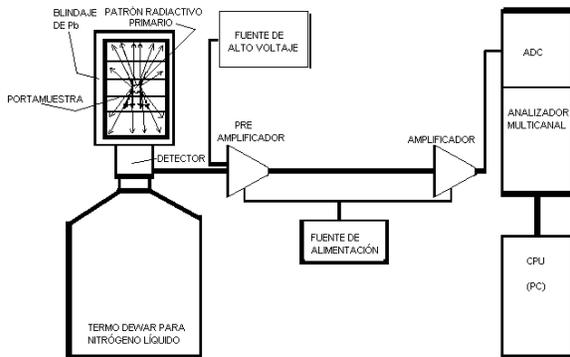


Fig. 2. Sistema de espectrometría gamma.

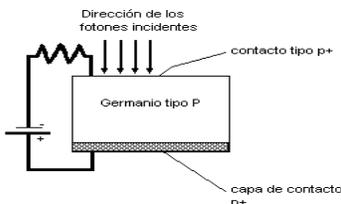


Fig. 3. Ilustración de un detector de estado sólido, tipo p de Germanio de alta pureza.

Los cuantos de radiación emitidos por una fuente, alcanzan el diodo semiconductor o detector de germanio Hiperpuro [GeHp], con

valores de energía definidos (líneas del espectro). Pero en el sistema de proceso de la señal y debido a varios factores, los valores de voltaje registrados presentan dispersión estadística, respecto del centroide de una distribución gaussiana, correspondiente a la energía de cada cuanto incidente.

A la salida del conjunto detector-preamplificador los valores de voltaje de la señal del detector se acondicionan en un amplificador y se digitalizan en un convertidor analógico-digital (ver figura 1), conservando la distribución de valores de conteo y energía.

El sistema cuenta los eventos de detección de partículas asociados con un nivel de voltaje de señal y le asigna una dirección de memoria digital en función de la energía del cuanto de radiación que incide (canales de memoria).

El mensurando es entonces, el conteo correspondiente al área del fotopico de forma gaussiana, limitada en sus extremos, por el ancho del pico a media altura y el voltaje medio o central de la distribución de cada grupo de señales con una energía asociada^[3].

Generalmente estos se registran y presentan en pantalla (figura 4), como espectros de frecuencias de conteo de emisión. La forma de las prominencias del espectro son usualmente de distribuciones gaussianas, correspondiente con las diferentes energías de cuantos de radiación incidentes y el número de cuentas asociadas, incluido un continuo base, formado por el fondo natural, el ruido electrónico inducido y/o generado en el sistema más las interacciones de radiación con el detector; como la Compton, la producción de pares y otras.

Las poblaciones de datos conforman el espectro de radiación gamma de la muestra.

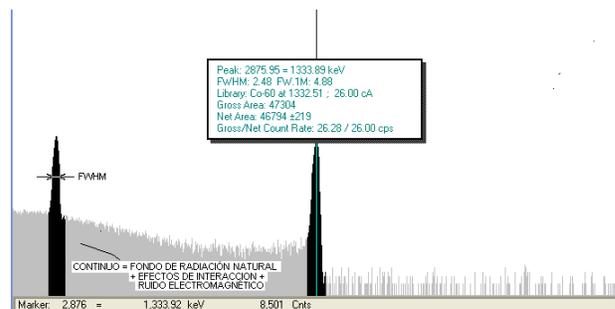


Fig. 4. Espectro de emisión gamma de una muestra de ⁶⁰Co, las áreas en negro corresponden a distribuciones de señal o picos asociadas a las líneas de emisión. A la izquierda

se ilustra un pico indicando el ancho a la mitad de su altura (FWHM) y el continuo base del espectro.

El patrón de actividad (espectrómetro), consta de varios módulos. Al incorporar componentes actualizados, compatibles, y bajo condiciones controladas, es posible mejorar la relación ruido señal, la selectividad o resolución, la estabilidad y la amplificación o su calidad en términos de precisión, exactitud o confiabilidad y reproducibilidad, además de sencillez de operación con relativa independencia del observador.

Pero es importante estudiar y caracterizar estos añadidos, ya que también podrían aportar ruido, retardo, saturación e inestabilidad de funcionamiento y mayor incertidumbre o restricciones a las características nominales anteriores del Patrón de las cuales la más importante es la eficiencia del detector.

La estructura modular del sistema, plantea problemas de obsolescencia del conjunto o de sus módulos, y que algunas de sus partes fallen o degraden su funcionamiento al paso del tiempo.

Este aspecto del patrón lo hace sujeto de mejoras, y reparaciones parciales y es necesario validar su reutilización sin necesidad del reemplazo total del sistema y superar limitaciones económicas.

En países en condiciones semejantes a las de México, no es sencillo reemplazar instrumentos Patrón. Actualizar sus sistemas puede ser una vía de extender su vida útil y superar su obsolescencia mientras se asegure que no se pierdan sus aptitudes metroológicas.

No conocemos experiencias análogas, tal vez lo sean las mejoras de instrumentos de medición en órbita extraterrestre, donde no es siempre posible el reemplazo total del instrumento de medición.

2. ANTECEDENTES.

El Sistema de detección de eventos y sus correspondientes energías (espectrómetro gamma), se ha conformado durante varios años. Originalmente en el año de 1997 fue designado y considerado Patrón Nacional ^[1]. A este sistema, con posterioridad, se le incorporaron nuevos implementos adicionales o de reemplazo.

Los nuevos implementos en el sistema aportaron mejoras en el registro de datos y la resolución en energía. En este caso disminuyó el ancho de la Gaussiana (dispersión de datos registrados). Y mejoró el despliegue del espectro en pantalla.

Se añadieron dispositivos para estabilizar el sistema durante el tratamiento de señal. Los componentes obsoletos; como el amplificador de salida, el analizador multicanal, se reemplazaron y se acopló una unidad central de proceso tipo PC.

También se automatizó el registro de datos de salida y el reporte correspondiente.

A continuación, se describe la evolución en el tiempo de la eficiencia de detección en el fotopico, determinada en función de las áreas de los fotopicos de diferentes energías y estas a su vez como una composición de funciones de diferentes variables.

3. METODOS DE CALCULO.

El método de cálculo de la actividad A_m de una muestra, descrito por la fórmula (1), requiere de conocer la llamada eficiencia ε en el fotopico, dada por la expresión (2). De los parámetros de ésta fórmula, la eficiencia es el mensurando que debe presentar características adecuadas de reproducibilidad y repetibilidad.

$$A_m = Cn \frac{1}{\varepsilon y t} \prod F_i \quad (1)$$

$$\varepsilon = Cn \frac{1}{A y t} \prod F_i \quad (2)$$

De la fórmula (2) se observa que la eficiencia en cuentas por gamma (c/γ) es función directa de la suma de eventos o cuentas netas (Cn), llamada área del fotopico o región de interés mostrada en la figura 4. Este es el mensurando que directamente se obtiene del instrumento y a su vez es función de la energía (número de canal) y del número de eventos registrados en esos canales o franjas del histograma. (y) es la probabilidad de emisión en la energía dada por cada cien eventos.

Esos eventos en total, considerados en un tiempo de conteo t , no sólo se deben a partículas cargadas o fotoelectrones producidos por la radiación de la fuente a medir. La radiactividad natural del fondo contribuye al área

total con el ruido electrónico inducido en el conjunto del sistema del espectrómetro.

Para cuantificar los efectos de la incorporación de implementos mencionados anteriormente, se seleccionaron los parámetros: eficiencia en el fotopico y ancho del fotopico a media altura (FWHM). Este parámetro se puede estimar de varias maneras por ejemplo con la fórmula (3).

El método para estimación de FWHM en canales, hace la suposición de que los picos son de forma Gaussiana. Para un sistema detector adecuado, esta no es una suposición irrazonable y se puede utilizar la siguiente fórmula:

$$FWHM = 0.939 \times Cn / (Ct - Co) \quad (3)$$

Donde Cn es el área del fotopico en cuentas y el denominador es la altura completa del pico, corregido para el fondo subyacente

Para expresar FWHM en unidades de energía (keV) debe conocerse g_c (ganancia de conversión de energía y en este caso $g_c = 0.54$ keV/canal

Entonces:

$$FWHM = 0.939 \times g_c \times A / (Ct - Co) \quad (4)$$

Desde el año 2006, se usó un algoritmo del programa Gamma Vision para evaluar FWHM.

4. RESULTADOS

En la tablas 1a y 1b se indica la evolución temporal de los citados parámetros; con los cuales se construyen los gráficos de control de las figuras 4 y 5, a partir de los límites de control; UACL (límite superior de acción), UWCL (límite superior de alerta), CL (línea central), LWCL (límite de advertencia inferior) y LACL (límite inferior de acción). Expresados como:

$$UACL = \bar{X} + \frac{3s}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

$$UWCL = \bar{X} + \frac{2s}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

$$CL = \bar{X} = \mu_0 \quad (7)$$

$$LWCL = \bar{X} - \frac{2s}{\sqrt{n}} \quad (8)$$

$$LACL = \bar{X} - \frac{3s}{\sqrt{n}} = \quad (9)$$

A continuación se describen las cartas de control de eficiencia en el período 2002-2009, y las correspondientes cartas de control del FWHM o resolución del sistema del año 2008, en que ocurrió un incidente de daño grave al módulo detector-preamplificador en el transistor de efecto de campo (FET) de entrada.

4.1 Descripción de las cartas de control.

En la tabla 1a) Se indican los años en los que se hizo el muestreo de eficiencia (datos tomados de libros de registro de calibración en eficiencia del Patrón Nacional en el LPR). Se indican también las respectivas desviaciones estándar muestrales s_i para un tamaño de muestra $n=4$. Los límites de control se calculan según las fórmulas (5),(6),(7),(8),(9), ^[4]. La línea base de referencia central ($LC=4.69E-04$ c/ γ) se intentó tomarla a partir de los valores medios de eficiencia ε_i de todos los años del intervalo de tiempo. Pero en 2008 una falla grave en el detector produjo pérdida de control, desplazando el valor medio de la eficiencia al considerar todo el intervalo 2002 -2009. Entonces el valor de eficiencia para la línea central de referencia se obtuvo a partir de seleccionar en el conjunto total de eficiencias, el valor que para dos patrones radiactivos certificados de Co-60, ^[5], ^[6] mejor reprodujese el valor nominal certificado ($LC=5.65E-04$ c/ γ). Postulamos que este sea el valor de la media objetivo.

En la Figura 5, se observa que hasta el año 2006, parece haber un paralelismo casi constante, de los valores de eficiencia con la línea media central. Después del año 2009, tras la reparación del preamplificador, la eficiencia se mantiene en el conjunto de valores previos a 2006. Pero superior en 1.9 % al valor asociado a la línea media central y evidentemente menor al nivel de alerta de la carta.

Este paralelismo podría indicar una perturbación frecuente como causa. El paralelismo se observa también en la tabla 1b o en la figura 6.

De modo análogo en la figura 6, donde se grafican variaciones temporales de FWHM en la

distribución del fotopico de 1332 keV como indicador de control, se observa que los valores muestrales de eficiencia, con tamaño $n=4$ todos permanecen dentro del intervalo de alerta excepto ante el evento de falla registrado en agosto del 2008. La línea central de referencia para la carta, no la definimos en base al valor promedio de las muestras, sino, considerando el valor objetivo $\mu=2.5$ keV reportado en 1997 [1] en las primeras pruebas de funcionamiento en el LPR (ver Fig. 6).

El valor del FWHM cuyas causas no analizamos aquí, podría originarse en perturbaciones eléctricas frecuentes y diversas, ya detectadas, como ruido electromagnético inducido por monitores de video con cañón electrónico y conexiones a tierra física de alta resistencia, transformadores de rayos X en las cercanías y microfonomismo del detector ante vibraciones mecánicas, por insuficiente amortiguamiento. Las asincronías entre módulos se sabe que no son relevantes conforme lo indican los certificados de calibración expedidos por el laboratorio de Metrología Eléctrica del ININ.

Las causales mencionadas, están bajo estudio, ya se inició la modificación de conexiones a tierra física y se iniciaran mejoras al amortiguamiento mecánico del detector con sustitución de monitores de video actuales por monitores de plasma.

Tabla 1a
CARTA DE PROMEDIOS DE EFICIENCIA

LÍMITE SUPERIOR	LINEA CENTRAL	LÍMITE INFERIOR	NIVEL DE ADVERTENCIA	
			SUPERIOR	INFERIOR
LSC	LC	LIC	UWCL	LWCL
7,57E-04	6,42E-04	5,27E-04	7,19E-04	5,65E-04

CARTA DE PROMEDIOS DE EFICIENCIA

AÑO	Cuentas/gamma	S_1
2002	6,76E-04	1,27E-06
2003	6,68E-04	2,02E-06
2004	6,81E-04	1,31E-06
2005	6,70E-04	3,07E-06
2006	6,55E-04	2,06E-06
2008	4,70E-04	3,27E-06
2009	6,74E-04	5,67E-06

PROMEDIO	s	n
6,42E-04	7,67E-05	4,00E+00

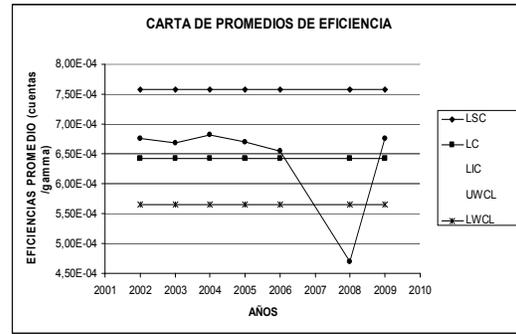


Fig. 5. Carta de control de eficiencias (2002-2009) (La fuente es un patrón primario de ^{60}Co , puntual, medido a 10 cm de distancia del detector).

TABLA 1b.
CARTA DE PROMEDIOS DE FWHM.

LÍMITE SUPERIOR	LINEA CENTRAL	LÍMITE INFERIOR	NIVEL DE ADVERTENCIA	
			SUPERIOR	INFERIOR
LSC	LC	LIC	UWCL	LWCL
4,26	2,50	0,74	3,67	1,33

CARTA DE MEDIAS DE FWHM DE Co-60 CON MEDIA OBJETIVO =2.5 keV

TIEMPO FECHA	FWHM (keV)	Desv. Std. s_1
21/04/2008	2,97	1,30E-02
02/06/2008	3,42	8,79E-02
13/08/2008	5,48	1,58E+00
15/08/2008	5,23	1,85E+00
14/10/2008	2,71	4,62E-02
30/10/2008	2,90	4,57E-02
03/11/2008	2,89	4,74E-02
25/06/2009	2,45	2,71E-02

MEDIA OBJVO (μ_0)	s	n
2,50	1,17	4,00

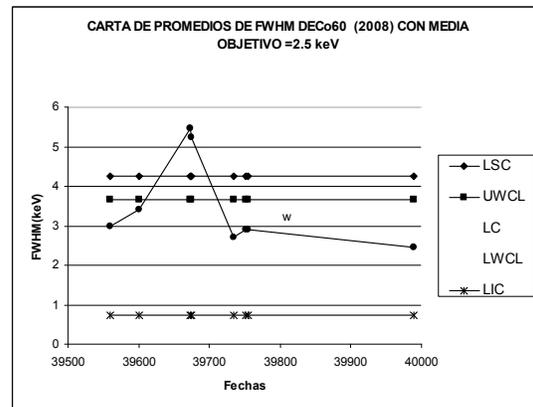


Fig. 6. Carta de control de resolución (2008) (obtenida en las mismas condiciones que la eficiencia de la carta anterior).

5. DISCUSIÓN.

5.1 Evolución del Patrón de Actividad.

Entre los años, 2005 y 2009 se presentaron tres eventos indicadores de cambio en las condiciones y características del sistema de detección. Fueron los siguientes en orden cronológico:

5.1.1 2005-04-07: El experto del BIPM visitó al LPR. Se determinó el FWHM del detector P.NM-02 en 4.5 keV a 1332 keV. Y se hicieron las siguientes recomendaciones sobre el espectrómetro patrón, sobre la instalación del LPR y en la práctica rutinaria.

a) Registro automático de espectros de radiación gamma y de los datos de salida del espectrómetro, los cuales leía y registraba manualmente un operador.

b) Mejorar la ganancia de conversión de 1 keV/canal a 0.5 keV/canal, al menos.

c) Mejorar la resolución de fotopicos los cuales eran 200% más anchos que lo recomendado para espectrómetros gamma con detectores de GeHp (2keV).

d) Revisión del funcionamiento de todos los componentes del sistema y corregir sus fallas.

5.1.2 2007-07-04: Se procesó por primera ocasión, la misma señal del detector en dos espectrómetros (Canberra 35 (Plus) y ACE/ORTEC) conectados en paralelo, con un sólo detector de GeHp, y se obtiene el espectro de radiación de una muestra certificada, con fines de intercomparación y de validar un espectrómetro con módulos de reemplazo como patrón alterno.

5.1.3 2009-04-30: Se incorpora en forma definitiva, al Espectrómetro Patrón, un analizador multicanal (MCA) 92x de EGG& ORTEC) y algunos implementos de reemplazo.

En la figura 5. Se presenta el diagrama de control para medias de la eficiencia. En esta carta se observa un conjunto de valores de eficiencia siempre mayores que los promedios de muestras de tamaño n y que rebasaron

claramente los límites de control, cuando se presentó un evento de falla del sistema en agosto de año 2008.

Los valores de eficiencia obtenidos entre el año 2002 y 2009, fluctúan en un intervalo de aceptación, que puede definirse por la comparación de actividad nuclear nominal (valor convencionalmente verdadero), de patrones radiactivos certificados, con las mediciones de actividad obtenidas en el laboratorio de patrones radiactivos del ININ de esas mismas fuentes radiactivas.

Por eso usamos como puntos de la línea central de la carta, los definidos por la media objetivo μ_0 en lugar de la recta definida por la media de los promedios muestrales.

La media objetivo se seleccionó de un conjunto de valores experimentales de actividad medida con el criterio del mejor ajuste experimental al valor certificado de las fuentes patrón.

En la Carta de control del FWHM (Fig. 6) se registran las variaciones durante 2008, y se usa como media objetivo, con un valor de 2.5 keV para el pico de 1332 keV de Co-60, en lugar de una media muestral, el FWHM obtenido en el año de 1999 ^[1].

Este valor de FWHM es muy diferente del especificado por el fabricante (1.71keV).

Pero como se observa de las tablas de FWHM obtenidas en el LPR desde 2005 hasta 2009 los valores en el intervalo $1.71\text{keV} < \text{FWHM} < 2.5\text{keV}$ se restauraron hasta 2009.

Existen registros de ruido electrónico inducido en el sistema, que indican que esto es una causa posible de ensanchamiento de los fotopicos y aún de daño a componentes. Además de la antigüedad de algunas partes del sistema y de las conexiones eléctricas a tierra física. También consideremos la susceptibilidad del detector a microfonismo. Estos puntos no se discuten aquí por limitaciones de espacio, Lo que es evidente en la grafica del FWHM es su valor como indicador del deterioro de funcionamiento del sistema.

5.2 Acciones correctivas.

5.2.1 Se reemplazaron; a la salida de detector de GeHp con preamplificador marca Canberra, el analizador multicanal (MCA) Canberra 35 plus de 4092 canales digitales, y el amplificador Canberra 2020 de Canberra Corp.

Incluida su fuente de alto voltaje, de arquitectura según norma NIM. Por la unidad multifuncional Spectrum Master 92X de EGG & ORTEC. Que incluye las funciones: MCA-ADC de 8184 canales, fuente de alto voltaje, estabilizador de señal, amplificador, cable paralelo de comunicación y tarjeta de interface con computador personal.

5.2.2 El reemplazo del amplificador Canberra 2020 por el amplificador interconstruido en la unidad multifunción Spectrum Master 92X de EGG & ORTEC. Introdujo cambios en el tiempo de formación de pulso de 4 a 6 μ s, y consecuentemente en la relación ruido señal lo que impacta directamente al valor del FWHM (*). Sin embargo se seleccionó 6 μ s de entre opciones.

5.2.3 Se reestructuraron procedimientos técnicos y administrativos, con responsabilidades, acciones y funciones de personal a cargo, bajo lineamientos de Garantía de Calidad.

5.2.4 Se incorporaron al sistema además de módulos de reemplazo, software en las etapas de control de la operación del espectrómetro: Con repetición automática de ciclos de medición, control por programa de los módulos y sus modos de operación, registro y reporte de datos de salida de las mediciones, despliegue mejorado de visibilidad de datos en pantalla, en tiempo real y otras más. Este software denominado Gamma Vision es propiedad de la firma EGG & ORTEC.

5.2.5 Se incorporó también, el uso de hoja electrónica para facilitar el ingreso de datos al programa EFICI9.BAS, para cálculo de actividad y para reingresar resultados a la hoja electrónica, con registro final de los resultados. Sin embargo la hoja electrónica y el EFICI9.BAS requieren asistencia frecuente del operador y se carece de un supervisor automático, el cual disminuiría errores del operador y mejoraría el desempeño. Permitiendo superar omisiones de control

5.3 Resultados de los sucesos y de las acciones emprendidas.

5.3.1 El impacto en la eficiencia del detector, debido al incidente de daño y su reparación, fue regresar al intervalo de valores inicial de eficiencias, los límites de control de alerta.

5.3.2 La incorporación o reemplazo, de componentes modulares del sistema patrón de espectrometría, no produjo cambios dentro de los límites de control de alerta.

5.3.3 El estudio de fluctuaciones pequeñas, dentro de estos límites, no ha concluido. Por ejemplo, está pendiente determinar con precisión, la causa de la diferencia aproximadamente constante de los promedios de eficiencia y resolución, con el valor de sus respectivas medias objetivo.

5.3.4 Se inició la modificación de conexiones a tierra física y se iniciaran mejoras al amortiguamiento mecánico del detector y sustitución de monitores de video actuales por monitores con pantalla de plasma.

5.3.5 Mejoró la ergonomía del espectrómetro, por el despliegue de datos e imagen en pantalla grande, reduciendo el margen de equivocación del operador. Esta condición tenía un deterioro severo por fallas del cinescopio del MCA reemplazado. Y se automatizó el reporte de datos de salida del MCA limitando también errores del operador.

5.4 Perspectivas.

Restaurar conexiones a tierra física, la eliminación de fuentes de ruido por radiofrecuencia, máquinas de Rayos X y monitores de video, la eliminación de excesivas vibraciones con mejoras a la suspensión del detector. Superarían el comportamiento anterior del espectrómetro en la resolución.

6. CONCLUSIONES.

- Los reemplazos de implementos antiguos del espectrómetro, la reparación del preamplificador y la automatización, produjeron poca variación en el valor de la eficiencia en el fotopico y de la resolución. Siempre por encima de la línea media que se postuló.

- Pese a los resultados mencionados, la vida útil del sistema, depende de la vida media entre fallas de componentes indispensables del sistema. El detector y su preamplificador integrado es crucial y tiene; con excepción de su FET nuevo, una antigüedad mayor a 30 años, desde su fabricación. Entones es esperable una falla en corto plazo. El detector y su preamplificador deben cambiarse a la brevedad.
- La automatización parcial del proceso de datos que se introdujo, no modificó significativamente los valores de los resultados por errores de redondeo.

7. REFERENCIAS

- [1] Cortés P.A, García D.O.C, Ortiz P. I. Becerril. A. Informe Técnico. GANS-00-04, 2000.
- [2] Knoll. F.G. Radiation Detection And Measurement. J. Wiley & Sons, 1st. Ed. 1979.
- [3] Debertain. K., Helmer. G.R. Gamma- And X-Ray Spectrometry With Semiconductor Detectors.
- [4] Irwin Miller- John E. Freund. Probabilidad y Estadística para Ingenieros Prentice Hall, 1997.
- [5] Certificado N°23263 de la fuente de Co-60 SN. 20166, LMRI, Actividad. 45.2 kBq, fecha de ref. 1997-06-04.
- [6] Certificado N° CT/090600/09/1100 de la fuente de la fuente de Co-60, SN 50226, AREVA, Actividad. 40.42 kBq, fecha de ref. 2009-07-17..
- [7] Norma ANSI N42. 14-1999 American National Standard Calibration and Usage of Germanium Detectors for Measurements of Gamma Ray Emision of Radionuclides.

(*) Nota: La relación ruido señal en el sistema, demerita, cuando el amplificador forma los pulsos de señal en un intervalo de tiempo más pequeño.