

Experimental Evaluation of the Response and Recovery Times of Geiger-Müller Counters

Walter Vargas-Segura¹; Carlos A. Jiménez-Carballo²

^{1,2}Costa Rica Institute of Technology, Cartago, Costa Rica, walvargas@itcr.ac.cr, carjimenez@itcr.ac.cr

Abstract— This work experimentally evaluates the dynamic behavior of digital and analog Geiger-Müller (GM) counters under operational conditions in a facility housing ionizing radiation sources. Although these instruments are widely used in radiation protection, their temporal response to abrupt changes in dose is not always considered in practice. For this study, quantitative criteria were defined to determine the response time (exceeding 90 % of the maximum recorded dose rate) and the recovery time (returning within 10 % of the reference value). Measurements were obtained through video analysis with a temporal resolution of 1/30 s, and five repetitions were performed for each condition. Time uncertainty was estimated as Type A in accordance with the GUM, and ANOVA and Tukey tests ($\alpha = 0,05$) were applied to evaluate differences among indication channels (numerical, audible, and visual). The results show that the characteristic times, on the order of seconds, depend significantly on the instrument type and output channel, being greater for numerical indicators than for alarms. The observed behavior is dominated by signal processing electronics rather than detector dead time, indicating that quantitative reading is not strictly instantaneous in scenarios involving rapid dose rate variations.

Keywords—Geiger-Müller counter, response time, recovery time, radiation protection, nuclear instrumentation.

Evaluación experimental del tiempo de respuesta y recuperación en contadores Geiger-Muller

Walter Vargas-Segura¹; Carlos A. Jiménez-Carballo²

^{1,2}Costa Rica Institute of Technology, Cartago, Costa Rica, walvargas@itcr.ac.cr, carjimenez@itcr.ac.cr

Resumen– El presente trabajo evalúa experimentalmente el comportamiento dinámico de contadores Geiger-Müller (GM) digitales y analógicos bajo condiciones operacionales en una instalación con equipos emisores de radiaciones ionizantes. Aunque estos instrumentos son ampliamente empleados en protección radiológica, su respuesta temporal ante variaciones abruptas en la tasa de dosis no siempre es considerada en práctica. Para este estudio, se definieron criterios cuantitativos para determinar el tiempo de respuesta (superación del 90 % del valor máximo de la tasa de dosis registrada) y el tiempo de recuperación (retorno dentro del 10 % del valor de referencia). Las mediciones fueron obtenidas mediante análisis de video con una resolución temporal de 1/30 s y se realizaron 5 repeticiones por condición. La incertidumbre del tiempo fue estimada como tipo A conforme a la GUM y se aplicaron pruebas ANOVA y Tukey ($\alpha=0,05$) para evaluar diferencias entre canales de indicación (cuantitativa, sonora y luminosa). Los resultados muestran que los tiempos característicos, del orden de segundos, dependen significativamente del tipo de instrumento y del canal de salida, siendo mayores para los indicadores numéricos que para las alarmas. Se demuestra que este comportamiento está dominado por la electrónica de procesamiento y no por el tiempo muerto del detector, lo que implica que la lectura cuantitativa no es estrictamente instantánea en escenarios con cambios rápidos en la tasa de dosis.

Palabras clave– contador Geiger-Muller, tiempo de respuesta, tiempo de recuperación, protección radiológica, instrumentación nuclear.

I. INTRODUCCIÓN

En instalaciones que utilizan radiaciones ionizantes es primordial que el personal ocupacionalmente expuesto, tanto técnico como profesional tenga claridad sobre las normas, procedimientos y los riesgos asociados al trabajar en estos entornos [1][2]. El entendimiento de las medidas de protección radiológica va más allá del conocimiento los conceptos básicos; esto incluye también, el uso correcto de los elementos de protección y la adecuada interpretación en la lectura de los instrumentos utilizados para medir los niveles de radiación presentes en el lugar de trabajo [3].

En Costa Rica, la gestión de la protección radiológica en instalaciones que utilizan radiaciones ionizantes se enmarca en la legislación nacional en materia de seguridad y salud en el trabajo, particularmente en el reglamento sobre Protección y Seguridad Radiológica [4] (Decreto Ejecutivo N° 44653-S). Este establece los requisitos para la protección del personal ocupacionalmente expuesto, incluyendo la adecuada utilización e interpretación de los instrumentos de monitoreo radiológico como parte de los programas de protección radiológica. En este

sentido, el desempeño adecuado de los instrumentos de medición constituye un elemento clave dentro de los sistemas para la prevención de riesgos radiológicos.

Los instrumentos de medida utilizados en la monitorización radiológica pueden clasificarse en dos categorías principales: dosímetros personales, correspondientes a la monitorización individual, e instrumentos de monitorización del lugar de trabajo [5]. Estos últimos pueden incluir sistemas pasivos para evaluación ambiental integrada o instrumentos activos de lectura directa, entre ellos los contadores Geiger-Muller (GM).

La correcta interpretación de las señales emitidas por estos instrumentos forma parte esencial del sistema de protección radiológica; ya que el desconocimiento de sus limitaciones puede conducir a una subestimación del riesgo [5]. En detectores GM, el tiempo muerto corresponde al intervalo inmediatamente posterior a la detección de un evento durante el cual el tubo no es capaz de registrar nuevas ionizaciones. Este fenómeno está asociado al proceso de descarga gaseosa y a la restauración del campo eléctrico interno, siendo típicamente del orden de microsegundos [6].

No obstante, el desempeño temporal de un instrumento de protección radiológica no está determinado únicamente por el tiempo muerto del detector. El comportamiento dinámico del sistema incluye además la respuesta asociada al procesamiento electrónico, la integración estadística de pulsos y los mecanismos de indicación visual o sonora. [6][7]

Es importante distinguir entre el tiempo muerto y la recuperación intrínseca del tubo GM y el comportamiento dinámico del instrumento como sistema de medición completo. A nivel del detector, el tiempo muerto y las características de recuperación/resolución se manifiestan típicamente en escalas del orden de microsegundos y se estudian mediante métodos dedicados (por ejemplo, el de dos fuentes, modelos generalizados y técnicas de medición de tiempo muerto), tal como se reportan en revisiones y estudios experimentales sobre determinación y efectos del tiempo muerto en sistemas de detección de radiación [8]-[11]. En contraste, la respuesta temporal observada por el usuario (tiempos de estabilización en la lectura cuantitativa del equipo, del orden de segundos) está dominada por la electrónica de procesamiento, promediado-integración y el sistema de indicación (display, aguja y alarmas), los cuales definen el desempeño operacional del

instrumento ante grandes cambios o altos gradientes en la tasa de dosis. En este sentido, normas para instrumentación de protección radiológica destacan la relevancia de parámetros como el tiempo de respuesta y recuperación para el uso en campo [7].

En este contexto, el tiempo de estabilización puede definirse como el intervalo requerido para que la lectura del instrumento converja y permanezca dentro de un margen predefinido respecto al valor real del campo de radiación tras una variación abrupta de la tasa de dosis. De acuerdo con la norma IEC 60846-1 [7], las características de tiempo de respuesta y recuperación constituyen parámetros críticos para el uso operacional adecuado de los instrumentos de protección radiológica.

Los contadores GM son uno de los dispositivos más utilizados para la evaluación de tasas de dosis en áreas controladas y supervisadas; sin embargo, aunque su principio de funcionamiento es ampliamente conocido [6], existe información experimental limitada sobre su comportamiento dinámico y sus tiempos de estabilización bajo condiciones operativas reales. La comprensión de estas características temporales resulta fundamental para evitar interpretaciones inadecuadas ante cambios abruptos en la tasa de dosis.

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar experimentalmente el tiempo de respuesta y el tiempo de recuperación de contadores GM digitales y analógicos bajo condiciones operacionales dentro de una instalación que alberga material radiactivo.

II. METODOLOGÍA

Para este trabajo se utilizaron 2 contadores GM portátiles. El primero corresponde a equipo digital marca Ludlum modelo 26-1, el cual dispone de una pantalla LCD que indica el valor de la tasa de dosis en $\mu\text{Sv/h}$. El rango superior de indicación del instrumento es de 2 mSv/h. Además, cuenta con un LED rojo de alarma intermitente y señal acústica de alarma ante la detección de radiación.

El segundo equipo es un contador GM analógico marca NDS Products, modelo ND-2000A con indicador de aguja y una escala base de 0 a 10 mR/h. El instrumento dispone de una perilla seleccionadora que permite multiplicar el valor indicado por factores de 1, 10 y 100. También cuenta con señal acústica al detectar radiación. Ambos equipos se muestran en la Fig. 1.

El estudio se realizó utilizando un irradiador autoblandado marca IZOTOP (Institute of Iotopes Co. LTD., Hungary) modelo ObServo-Ignis, que contiene 24 lápices de cobalto 60. La zona de mayor tasa de dosis corresponde al área de carga del irradiador. La Fig. 2 muestra las posiciones de los detectores dentro de la zona de carga del irradiador durante el experimento.

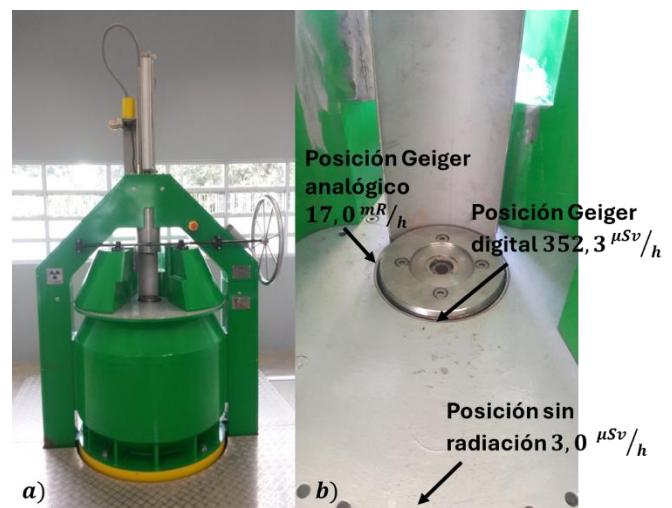


Fig. 2. a) Irradiador utilizado y b) Posición de cada detector dentro de la zona de carga del irradiador.

En la posición de radiación seleccionada para cada instrumento, la tasa de dosis promedio registrada por el equipo digital fue de 352,3 $\mu\text{Sv/h}$, con una desviación estándar de 12,83 $\mu\text{Sv/h}$. Para el equipo analógico, la tasa de dosis registrada fue de aproximadamente 17 mR/h con una desviación estándar de 10 mR/h. Importante aclarar que en equipos antiguos se solía utilizar el roentgen (R) que es la unidad de exposición en aire definida como la cantidad de radiación X o gamma que produce una carga de $2,58 \times 10^{-4}$ coulomb por kilogramo de aire seco [12]; es decir:

$$1 \text{ R} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/kg} \quad (1)$$

Para radiación gamma en aire, 1 R corresponde aproximadamente a 0,00876 Gy de kerma en aire. Esto proviene de la energía media requerida para producir un par ión-electrón en aire ($\sim 33,97 \text{ eV}$). Más explícitamente de la relación [13]:

$$K_{aire} = X \cdot \frac{W_{aire}}{e} \quad (2)$$

donde W_{aire} es igual a 33,97 eV y e es $1,602 \times 10^{-19}$ C.

Finalmente, considerando que para radiación gamma el factor de ponderación radiológico es $w_R = 1$, la dosis equivalente es numéricamente cercana a la dosis absorbida, de aquí se tiene la equivalencia de $1 \text{ R} = 0,00876 \text{ Sv}$, que para fines operacionales se toma que $1 \text{ R} \approx 0,01 \text{ Sv}$. Por lo tanto, 17 mR/h corresponde aproximadamente a 170 $\mu\text{Sv/h}$. Importante señalar que, en ambos casos, los instrumentos operaron dentro de su rango nominal, sin alcanzar condición de sobresaturación.

El experimento se dividió en dos etapas: determinación del tiempo de respuesta y determinación del tiempo de recuperación.

Se definió el tiempo de respuesta como el intervalo transcurrido desde la exposición del contador GM al campo de radiación hasta que el indicador correspondiente (display, alarma sonora o indicador luminoso) supera el 90 % de la tasa máxima registrada o es activado en el caso de las alarmas.

El tiempo de recuperación se definió como el intervalo transcurrido desde la retirada del detector del campo de radiación hasta que el indicador retoma y se estabiliza dentro de del 10 % del valor de referencia, o se desactiva en el caso de las alarmas sonora y luminosa.

El proceso fue grabado en video y posteriormente analizado mediante el software Filmora (Wondershare Technology Group Co., Ltd., USA). El formato temporal del video fue mm:ss:frames; donde 30 fotogramas equivalen a un segundo, lo que establece una resolución temporal de 1/30 s ($\approx 0,033$ s). Se asumió que cada fotograma representa un intervalo de tiempo uniforme.

Se realizaron 5 repeticiones para cada dirección (entrada y salida del campo de radiación), calculándose el valor promedio del tiempo y la incertidumbre como Tipo A conforme a la Guía para la Expresión de la Incertidumbre en la Medición (GUM) [14].

Con el fin de evaluar la existencia de diferencias significativas entre los tiempos asociados a los distintos canales de indicación, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía con un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$. Cuando el resultado fue significativo, se realizó la prueba Tukey para identificar los pares de canales que presentaban diferencias estadísticamente significativas. Además, se realizan gráfica de cajas para una visualización de los resultados del tiempo en ambas condiciones experimentales.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las diferencias en la tasa de dosis registradas por los instrumentos se deben a las dimensiones del detector, a que no se trata de un campo de radiación abierto que cubra a todo el detector y a que la posición del contador GM en la zona de irradiación fuese reproducible. Estos valores en la tasa señalados en la metodología indican que tanto el contador digital como el analógico operaron a un nivel muy por debajo de las condiciones de sobre escala o saturación; así que los resultados obtenidos reflejan principalmente la dinámica de integración, filtrado y visualización del instrumento y no limitaciones intrínsecas del tubo Geiger. Para esto, se procuró una tasa de dosis lo más estable posible, conociendo que la tasa de conteo es una estimación estadística, por lo que, la incertidumbre relativa sigue la relación [6]:

$$\frac{\sigma_N}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}} \quad (3)$$

De acuerdo con Knoll [5], la respuesta de los medidores de tasa está determinada por la estadística de conteo y por el tiempo de integración requerido para alcanzar una estimación estable de la tasa de conteo, el cual depende del número de eventos registrados.

Los tiempos de respuesta para ambos contadores se tabularon en la tabla 1 y se muestran en la Fig. 3. Para el caso de la alarma acústica del GM analógico, la resolución del video no permitió medir un retardo en el tiempo entre la colocación en la posición y la activación de la alarma.

La Fig. 3 muestra la distribución de tiempos para cada instrumento y canal de indicación. Se observa que los canales de alarma presentan tiempos menores que los indicadores cuantitativos de tasa de dosis, siendo el indicador analógico el que exhibe el mayor retardo. La separación entre las cajas sugiere diferencias relevantes, que se analizarán a continuación. En ambos contadores GM se observa que el tiempo de respuesta depende del canal de salida, no solo del detector. Aunque el tubo es el mismo, cada canal tiene su propia electrónica y lógica de activación. Para el equipo digital la prueba ANOVA mostró diferencias estadísticamente significativas entre los canales ($p = 3,4 \times 10^{-6}$), confirmando que los distintos sistemas de indicación del instrumento presentan comportamientos dinámicos diferenciados, y como resultado de la prueba Tukey se determinó que el indicador digital presenta un tiempo de respuesta significativamente mayor que los otros dos canales ($p < 0,05$); mientras, que no se detectó una diferencia estadísticamente significativa entre la alarma sonora y el indicador luminoso ($p = 0,25$). Además, estos resultados han demostrado que, incluso operando dentro del rango nominal, la indicación cuantitativa no es instantánea ante transiciones abruptas en la tasa de dosis.

TABLA I
RESULTADOS DE TIEMPO DE RESPUESTA

Medida	GM Digital			GM Analógico	
	Tiempo (s)			Tiempo (s)	
	Ind. Digital	Sonido	Luz	Ind. Analógico	Sonido
1	1,47	0,97	1,23	3,13	0,00
2	1,90	0,40	0,67	3,73	0,00
3	2,13	0,67	0,90	3,40	0,00
4	2,10	0,63	0,87	3,63	0,00
5	2,00	0,53	0,77	3,33	0,00
Promedio	1,92	0,64	0,89	3,45	0,00
Desv. Est.	0,27	0,21	0,21	0,24	0,00
Incertidumbre	0,12	0,09	0,10	0,11	

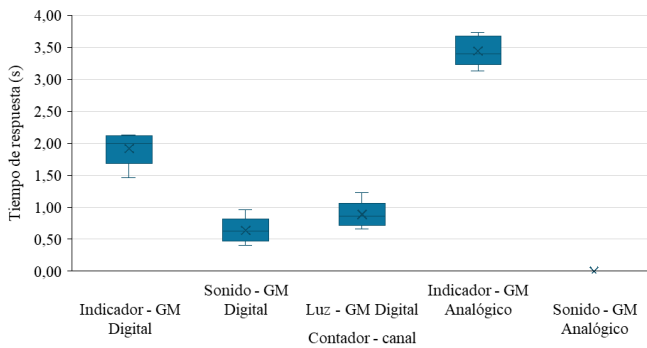


Fig 3. Gráfica de cajas del tiempo de respuesta para ambos GM.

Con el detector analógico, no fue posible hacer este proceso por la rápida respuesta que presenta la alarma sonora, y la comparación entre ambos equipos tampoco fue posible; ya que, por la metodología empleada, es razonable considerar una dependencia del tiempo de respuesta y de estabilización con la tasa de dosis, dado que la indicación se basa en una estimación estadística de la tasa de conteo [6][7]. Es decir, el tubo GM solo genera pulsos, la dinámica temporal está dominada por la electrónica, los filtros y el promediado de las señales registradas, el tiempo necesario para una lectura estable no es independiente de la tasa de dosis [15].

Estudios recientes también han reportado que la respuesta dinámica de los sistemas de detección de radiación está influenciada por el procesamiento de señal y la estadística de conteo, más que exclusivamente por la física del detector [8]-[11]. Estos resultados respaldan los hallazgos del presente trabajo, reforzando la interpretación de que los tiempos de respuesta y recuperación en instrumentos basados en detectores GM están determinados en gran medida por los mecanismos electrónicos de integración y filtrado.

Los resultados para la segunda parte del experimento se muestran en la tabla 2 y en la Fig. 4. Para esta parte ya se reportan datos para la alarma sonora en el contador GM analógico, reportando la mayor dispersión en los datos medidos.

Al igual que en la primera etapa del experimento, el tiempo de recuperación depende del canal de salida, no solo del detector. La Fig. 4 muestra los tiempos de recuperación para ambos instrumentos. Se observa que los indicadores cuantitativos de la tasa de dosis presentan tiempos mayores que las alarmas, siendo el indicador analógico el que exhibe el mayor retardo. Este comportamiento es consistente con la respuesta exponencial de sistemas de integración RC y la inercia electromecánica. El resultado del análisis de varianza para los canales en el instrumento digital mostró diferencias estadísticamente significativas entre los canales ($p = 0,002$). Al aplicar la prueba Tukey para identificar las diferencias específicas entre los canales, se encontraron diferencias significativas entre el indicador digital y la alarma sonora ($p = 0,02$), así como también entre el indicador digital y la alarma luminosa ($p = 0,0018$), y para el caso de las alarmas sonora y luminosa, no se encontraron diferencias significativas entre

TABLA II
RESULTADOS DE TIEMPO DE RECUPERACIÓN

Medida	GM Digital			GM Analógico	
	Tiempo (s)			Tiempo (s)	
	Ind. Digital	Sonido	Luz	Ind. Analógico	Sonido
1	1,33	1,07	0,80	2,50	1,03
2	1,07	0,73	0,33	2,63	0,57
3	2,03	0,83	0,53	2,70	0,23
4	2,03	0,73	0,50	2,63	0,80
5	1,53	1,30	1,07	2,60	0,73
Promedio	1,60	0,93	0,65	2,61	0,67
Desv. Est.	0,43	0,25	0,29	0,07	0,30
Incertidumbre	0,19	0,11	0,13	0,03	0,13

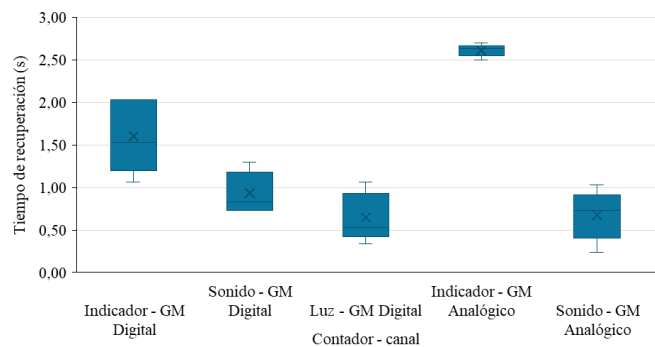


Fig 4. Gráfica de cajas del tiempo de recuperación para ambos GM

ambos canales ($p = 0,388$), confirmando que el indicador digital presenta un tiempo de recuperación significativamente mayor que los otros dos canales.

Para el caso del contador analógico se realizó el análisis de varianza en los valores de respuesta del indicador analógico y la alarma sonora, observándose una diferencia significativa entre ambos canales ($p = 5,98 \times 10^{-7}$), resultado en que el indicador analógico presenta un retardo considerablemente mayor que la alarma sonora.

En ambas etapas del experimento, el mayor tiempo observado en el indicador analógico es consistente con el principio de operación de los medidores de tasa basados en integración analógica. En este tipo de instrumento, los pulsos generados por el tubo GM son convertidos en una señal de voltaje (V) promedio mediante un circuito de integración RC, cuya constante de tiempo ($\tau = RC$) determina la velocidad de convergencia hacia el valor estacionario. La respuesta temporal del sistema sigue un comportamiento exponencial del tipo:

$$V(t) = V_{max} (1 - e^{-t/\tau}) \quad (4)$$

Por lo que el tiempo requerido para alcanzar una fracción significativa del valor final es del orden de varios múltiplos de τ [6]. Adicionalmente, el indicador de aguja incorpora amortiguamiento electromecánico que introduce inercia adicional en la indicación visual. En consecuencia, el retardo observado en el instrumento analógico no está asociado al tiempo muerto del detector, sino al diseño del sistema de integración y visualización [6].

Es importante destacar que los tiempos medidos, del orden de segundos, son varios órdenes de magnitud mayores que el tiempo muerto intrínseco del tubo GM, típicamente del orden de microsegundos [6]. Por lo tanto, el fenómeno observado no está relacionado con el tiempo muerto del detector, sino con la respuesta del sistema y la recuperación de la electrónica de conteo y visualización.

Desde la perspectiva de innovación, la caracterización de los parámetros dinámicos de respuesta resulta relevante para el desarrollo y validación de sistemas de monitoreo radiológico de nueva generación, incluyendo instrumentación digital, plataformas de monitoreo en tiempo real y sistemas de alarmas inteligentes. La comprensión de estas limitaciones temporales es fundamental para mejorar la confiabilidad de los datos en esquemas automatizados o asistidos por inteligencia artificial en protección radiológica.

Aunque el presente trabajo permite caracterizar experimentalmente el comportamiento dinámico de los contadores GM evaluados bajo condiciones operacionales reales, es importante señalar algunas limitaciones inherentes al diseño experimental.

En primer lugar, la determinación de los tiempos de respuesta y recuperación se realizó mediante análisis de video con una resolución temporal de 1/30 s, lo que introduce una incertidumbre asociada a la discretización temporal. Si bien esta resolución es suficiente para fenómenos del orden de segundos, no permite evaluar con precisión procesos en escalas inferiores.

En segundo lugar, las mediciones se efectuaron a un único nivel de tasa de dosis para cada instrumento, por lo que no se evaluó la posible dependencia de los tiempos de estabilización al variar este parámetro; ya que, desde el punto de vista estadístico, la constante de tiempo asociada a la integración de pulsos puede variar con la tasa de conteo debido a la naturaleza probabilística del proceso de detección. Además, que no fue posible llevar los instrumentos a condiciones de sobresaturación debido a restricciones operacionales y consideraciones de protección radiológica.

Asimismo, no se analizaron variaciones asociadas a parámetros de operación del detector que, según la literatura [6], [15], pueden influir en el comportamiento dinámico de los tubos GM, tales como voltaje aplicado; esto por ser un equipo comercial con un fin definido, y condiciones ambientales, aunque en este sentido los cambios en la instalación no suelen ser muy grandes por las características climáticas del país.

Finalmente, el estudio se centró en la respuesta global del instrumento como sistema de medición, sin realizar una descomposición experimental independiente de las contribuciones electrónicas y electromecánicas. No obstante, el diseño experimental adoptado permite caracterizar el desempeño operacional real del instrumento, que es el escenario de interés desde la perspectiva de la protección radiológica aplicada.

IV. CONCLUSIONES

El presente estudio permitió caracterizar experimentalmente el comportamiento dinámico de contadores GM digitales y analógicos bajo condiciones operacionales. Los resultados demuestran que los tiempos de respuesta y recuperación, del orden de segundos, dependen significativamente del canal de indicación y del diseño del instrumento siendo mayores en los indicadores cuantitativos de la tasa de dosis que en las alarmas sonora y luminosa.

Se evidencia que estos tiempos no están gobernados por el tiempo muerto intrínseco del tubo -del orden de microsegundos- sino por los procesos de integración electrónica, filtrado y mecanismos de visualización del sistema de medición. En particular, el comportamiento del indicador analógico es consistente con la respuesta exponencial del sistema RC y la inercia electromecánica.

Desde el punto de vista de la protección radiológica, estos hallazgos resaltan que la indicación cuantitativa de la tasa de

dosis no es estrictamente instantánea ante variaciones abruptas de la tasa de dosis. Por tanto, el conocimiento de las características dinámicas del instrumento constituye un elemento relevante para la interpretación adecuada de mediciones en campo, la elaboración de procedimientos y la capacitación del personal ocupacionalmente expuesto.

La evaluación del desempeño dinámico debería considerarse un complemento necesario a la calibración metrológica en la caracterización integral de instrumentos portátiles de protección radiológica. Asimismo, estos resultados aportan elementos relevantes para el desarrollo y evaluación de sistemas de monitoreo radiológico modernos, particularmente aquellos basados en instrumentos digitales, monitoreo en tiempo real y aplicaciones asistidas por inteligencia artificial.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Agradecemos a la Vicerrectoría de Investigación del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) por financiar esta investigación bajo la actividad de fortalecimiento “Diagnóstico de situación del programa de protección radiológica en el Centro de Investigación y Extensión de Ingeniería en Materiales del Instituto Tecnológico de Costa Rica, con apoyo de herramientas de Inteligencia Artificial (IA)” (ID en Pure: 3627646), al Laboratorio de Irradiación Gamma del Centro de Investigación y Extensión en Materiales del Tecnológico de Costa Rica (CIEMTEC).

REFERENCES

- [1] Organismo Internacional de Energía Atómica, *Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: Normas básicas internacionales de seguridad*, Colección Normas de Seguridad del OIEA No. GSR Part 3, Viena, Austria: OIEA, 2016.
- [2] Organismo Internacional de Energía Atómica, *Evaluación de la seguridad de las instalaciones y actividades*, Colección Normas de Seguridad del OIEA No. GSR Part 4 (Rev. 1), Viena, Austria: OIEA, 2018.
- [3] International Commission on Radiological Protection, *General Principles for the Radiation Protection of Workers*, ICRP Publication 75. Oxford, U.K.: Pergamon Press, 1997.
- [4] Gobierno de Costa Rica, *Reglamento sobre Protección y Seguridad Radiológica*, Decreto Ejecutivo N° 44653-S, San José, Costa Rica, 2024.
- [5] Organismo Internacional de Energía Atómica, *Protección radiológica ocupacional*, Colección Normas de Seguridad del OIEA No. GSG-7, Viena, Austria: OIEA, 2022.
- [6] G. F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2010.
- [7] International Electrotechnical Commission, *Radiation protection instrumentation – Ambient and directional dose equivalent (rate) meters and/or monitors for beta, X and gamma radiation – Part 1: Portable workplace and environmental meters and monitors*, IEC 60846-1:2009, Geneva, Switzerland: IEC, 2009.
- [8] S. Usman and A. Patil, “Radiation detector deadline and pile-up: A review of the status of science,” *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 50, no. 7, pp. 1006–1016, 2018.
- [9] D.P. Quyet and A. T. T. Trinh, “Determination of the dead time of a GM counter using the two-source method”, *International Journal of Science and Research Archive*, 2024.
- [10] T. Akyurek, “A new dead-time determination method for gamma-ray detectors using attenuation law”, *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 56, no. 12, pp 4093-4097, 2021.
- [11] T. Akyurek, M. Yousaf, X. Liu and S. Usman, “GM counter deadline dependence on applied voltage, operating temperature and fatigue”, *Radiation Measurements*, vol. 73, pp 26-35, 2015.
- [12] International Commission on Radiation Units and Measurements, *Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation*, ICRU Report 85, Journal of the ICRU, vol. 11, no. 1, Oxford, U.K.: Oxford University Press, 2011.
- [13] International Commission on Radiation Units and Measurements, *Radiation quantities and Units*, ICRU Report 33, Washington, DC, USA: ICRU, 1980.
- [14] Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), *Evaluation of Measurement Data — Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, JCGM 100:2008, Sèvres, France: BIPM, 2008.
- [15] G. L’Annunziata, *Handbook of Radioactivity Analysis*, 4th ed. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2020.