

Geiger Müller counter prototipe construction as dosimetric support in ionizing radiation monitoring

Construcción de un prototipo de contador Geiger Müller como apoyo dosimétrico en la vigilancia de radiaciones ionizantes

A. Arismendi-Ramírez ; J. L. Quintero-López ; A. L. Pérez-Rendón , J. E. Perea-Moreno 

DOI: <https://doi.org/10.22517/23447214.24569>

Artículo de investigación científica y tecnológica

Abstract— In radiological protection, it is important to measure the entry dose to the skin as a direct dosimetric indicator or as a base data for a subsequent calculation of the effective dose or equivalent dose. Geiger Counters are particle and ionizing radiation detectors that emit different radiation sources. They are used as environmental dosimeters, measuring the equivalent dose rate in the air at critical points in exposed and unexposed areas in radiology services. This article shows the construction of a Geiger Müller counter from the use of open source technologies such as the arduino is, these systems allow the integration of different applications at very affordable costs, easy programming and assembly, the device not only allows measurement radiation dose perceived in conventional radiology areas, but also has a thermo-hygrometer capturing two extra fundamental variables for monitoring temperature and relative humidity of the equipment operating environment, in its configuration the prototype performs measurements remotely and in real time, without exposing the professional who performs the monitoring; With the location of the device in the right place, said measurement is transmitted to be viewed from any computer or mobile device, also through sending to viewing platforms, having the freedom to carry out continuous monitoring, storing said information to keep track strict in the management of emissions in the rooms where the different radiological equipment operates.

Index Terms— Dosimetry, Geiger Müller Counters, Ionizing Radiation, Radiological Protection.

Resumen— En la protección radiológica es importante medir la dosis de entrada en piel como indicador dosimétrico directo o como dato base para un cálculo posterior de la dosis efectiva o equivalente. Los Contadores Geiger son detectores de partículas y de radiación ionizante que emiten las diferentes fuentes de radiación, se emplean como dosímetros ambientales, midiendo la tasa de dosis equivalente en el aire en puntos críticos de las áreas expuestas y no expuestas en los servicios de radiología. El presente

Este manuscrito fue enviado el 29 de mayo de 2020 y aceptado 20 de junio 2021.

Andrés Arismendi Ramírez is with the of basic science department at the Fundación Universitaria del Área Andina, Calle 24 8-55, Pereira, Colombia (e-mail: aarismendi2@areandina.edu.co).

Jorge Luis Quintero is with the of Radiology department at the Fundación Universitaria del Área Andina, Calle 24 8-55, Pereira, Colombia (e-mail: jqintero108@areandina.edu.co).

artículo muestra la construcción de un contador Geiger Müller a partir del aprovechamiento de tecnologías de código abierto como lo es el arduino, dichos sistemas permiten la integración de diferentes aplicaciones a costos muy asequibles, fácil programación y ensamble, el dispositivo no solo permite la medición de las dosis de radiación percibida en el áreas de radiología convencional, sino que además posee un termohigrómetro captando dos variables extra fundamentales para monitoreo de temperatura y la humedad relativa del entorno donde se esté operando el equipo, en su configuración el prototipo realiza mediciones de manera remota y en tiempo real, sin exponer al profesional que realice el monitoreo; con la ubicación del dispositivo en el sitio adecuado se transmite dicha medida para ser visualizada desde cualquier dispositivo de computo o móvil, además a través del envío a plataformas de visualización, teniendo la libertad de realizar seguimiento continuo, almacenando dicha información para llevar un control estricto en el manejo de las emisiones en las salas donde los diferentes equipos radiológicos operen.

Palabras claves— Contadores Geiger Müller, Dosimetría, Protección Radiológica, Radiación Ionizante.

I. INTRODUCCIÓN

La radiación ionizante incluye los rayos cósmicos, los rayos α y la radiación proveniente de materiales radiactivos. Vivimos en un mundo donde la radiación está presente en todas partes de manera natural [1]. Hablar de radiación es referirnos netamente a la característica que tiene la naturaleza de manifestar su energía. Esta energía se emite desde los átomos y se propaga en forma de onda electromagnética o en forma de partícula [2]. Los rayos X pertenecen a la radiación electromagnética como los rayos infrarrojos, ultravioletas y

Ángela Liceth Pérez Rendón is with the of basic science department at the Fundación Universitaria del Área Andina, Calle 24 8-55, Pereira, Colombia (e-mail: aperez56@areandina.edu.co).

Jimmy Enrique Perea Moreno is with the of Radiology department at the Fundación Universitaria del Área Andina, Calle 24 8-55, Pereira, Colombia (e-mail: jperea2@areandina.edu.co).



gamma, siendo de la misma naturaleza que las ondas de radio, microondas y luz visible. La diferencia fundamental con los rayos gamma es su origen, ya que estos son radiaciones de origen nuclear que se producen por la desintegración del núcleo realizando una transición más estable por cada semivida, mientras que los rayos X surgen de fenómenos extra nucleares, a nivel de la órbita electrónica, fundamentalmente producidos por la desaceleración de electrones [3].

Es importante conocer los efectos de la radiación ionizante en el material biológico, ellos dependen en gran medida de la dosis absorbida como se evidencia en la tabla 1, su unidad es el Gray (Gy) y es equivalente a la energía por unidad de masa, en determinados estudios radiológicos se realiza una medición de la dosis absorbida por el paciente como herramienta de control como se muestra en la tabla I [4].

TABLA I
EFECTOS SOBRE ALGUNOS TEJIDOS Y ÓRGANOS EXPUESTOS
SEGÚN LA DOSIS

Órgano	Dosis Media Absorbida (Gy)	Efectos
Piel	5	Alopecia
Piel	2 a 5	Eritema
Testículo	> 4	Esterilidad permanente
Testículo	0,15 a 4	Esterilidad temporal
Ovarios	> 3	Esterilidad permanente
Ovarios	> 0,6	Esterilidad temporal
Cristalino	> 2	Cataratas
Medula Ósea	0,25	Decrecimiento plaquetario

Es de destacar que, el hombre se ha beneficiado de este tipo de radiaciones, y mejor aún, las ha podido crear por medio de diferentes dispositivos; como es el caso de los equipos de rayos X para uso médico, tomógrafos, mamógrafos, arcos en C, angiógrafos; los cuales después del descubrimiento de los rayos x en el año 1895 por parte de Wilhelm Conrad Roetgen [5], dieron origen al uso médico de las radiaciones ionizantes, las cuales se convirtieron en la mayor fuente de radiación artificial en el planeta, aportando el 20% a la exposición de la población mundial [6], por medio de diferentes técnicas de imagen como, la radiología convencional, tomografía computarizada, radiología intervencionista, y mamografía entre otras. Resulta oportuno mencionar que, el aporte de este tipo de radiaciones en el ámbito médico y la humanidad ha sido cuantioso, en informe de la UNSCEAR se observa un incremento del 42,5% entre el periodo del 2000 al 2008, por ello es totalmente relevante realizar un control estricto y velar por el cumplimiento de las regulaciones establecidas.

En consecuencia, a pesar del aporte tan significativo de la radiación ionizante a la medicina, esta relación ha tenido sus altibajos, puesto que, durante los primeros años de su implementación se pudo evidenciar los efectos nocivos de las mismas; esto debido a su excesivo e incontrolado uso [5], lo que generó lesiones e inclusive cobró la vida de un sin número de personas, entre operarios de los equipos, pacientes y personal expuesto [6].

En efecto, como respuesta a los inconvenientes derivados del uso de la radiación ionizante, se crean diferentes organismos

internacionales como: la ICRP la cual surge en 1928, con el propósito de “responder a las crecientes preocupaciones sobre los efectos de la radiación ionizante observada en la comunidad médica” [7]. La ICRP se constituyó en el principal órgano de referencia en cuanto al tema de radio protección en el mundo; teniendo en cuenta que la misma emite directrices y recomendaciones desde el año 1958; estas a su vez, son adoptadas por diferentes países, y en muchos casos son incluidas en sus ordenamientos jurídicos. Asimismo, la ICRU, tuvo sus inicios en 1928, y surge con la intención de “proponer una unidad para medir la radiación aplicada en medicina” [8]. Del mismo modo, la UNSCEAR, fue creada en 1955, y su función es “evaluar e informar los niveles y los efectos de la exposición a la radiación ionizante” [9]. De manera análoga, la IAEA, se originó en 1957, y se ocupa de “promover la utilización de las tecnologías nucleares con fines pacíficos y en condiciones de seguridad tecnológica y física” [10]. Los organismos mencionados anteriormente, establecen las recomendaciones para el cumplimiento de los principios de la protección radiológica; estos a su vez determinan el actuar de los profesionales expuestos a la radiación ionizante, los cuales deben laborar en ambientes seguros y realizar prácticas que garanticen el adecuado uso de las radiaciones ionizantes; por lo tanto es necesario el uso de equipos que permitan monitorizarla, detectarla, medirla, cuantificarla y vigilarla, para establecer que se encuentren dentro de los límites legales [11].

Los métodos físicos para medir dosis de radiación se comenzaron a desarrollar en las décadas del 20. En la actualidad son sumamente precisos. No obstante, la práctica ha demostrado que con los accidentes se dañan los dosímetros o las personas sin portarlo se exponen [12].

El sistema de dosimetría mide de forma directa o indirecta la exposición, dosis absorbida, equivalente o efectiva.

Entre los dispositivos de medición se encuentran, los detectores de ionización gaseosa, cámaras de ionización, contador proporcional, dosímetros termoluminiscentes, dosímetros de película, y por supuesto el contador de Geiger Müller [13].

Dichos instrumentos son utilizados para realizar la medición de la radiación a la que se exponen, especialmente los trabajadores ocupacionalmente expuestos (TOEs), llevando así un control en las dosis de radiación, prevenir exposiciones innecesarias y sobreexposición.

En este artículo, se presenta la construcción de un prototipo de contador Geiger Müller basado en tecnología de código abierto para el procesamiento y visualización de mediciones de radiaciones ionizantes, temperatura y humedad en las salas de radiología convencional. Este prototipo está diseñado para apoyar al oficial de protección radiológica en la medición de las radiaciones secundarias como la radiación de fuga y la radiación dispersa, así como un dosímetro para el personal de salud y administrativo potencialmente expuesto en las salas donde se opere con equipos de radiación.

Para la adquisición y el procesamiento de las medidas, este prototipo hace uso de sensores confiables para la adquisición de las variables en estudio, así como del software Arduino. Ide en la programación de la tarjeta mega como entorno central del

sistema en tratamiento de las señales y visualización de las mismas, finalmente desde los dispositivos de computo y móviles se accede a la plataforma ThingSpeak la cuál es gratuita y permite enlazar a través de una IP la visualización de las mediciones desde cualquier lugar, evitando exposiciones innecesarias y garantizando los principios de protección radiológica entre ellos ALARA por sus siglas en inglés “As Low As Reasonably Achievable” es decir, “Tan bajo como sea razonablemente posible”.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Para llevar a cabo este proyecto primero se realizó una revisión bibliográfica abordando el estudio de los diferentes prototipos Geiger Müller existentes en el mercado y a partir de los hallazgos obtenidos se prosiguió al diseño y construcción del mismo, teniendo en cuenta el aprovechamiento de las ya mencionadas tecnologías de acceso libre. En esta sección se describen los materiales utilizados para la construcción del equipo, la plataforma de programación de la tarjeta de desarrollo la cual se hace a través del software Arduino IDE, la plataforma de visualización ThingSpeak y los elementos relevantes en la construcción del prototipo.

A. Materiales

El prototipo de contador Geiger Müller en su arquitectura está dividido en tres bloques, entradas, procesamiento y salidas, en la figura 1 muestra el diagrama de bloques:

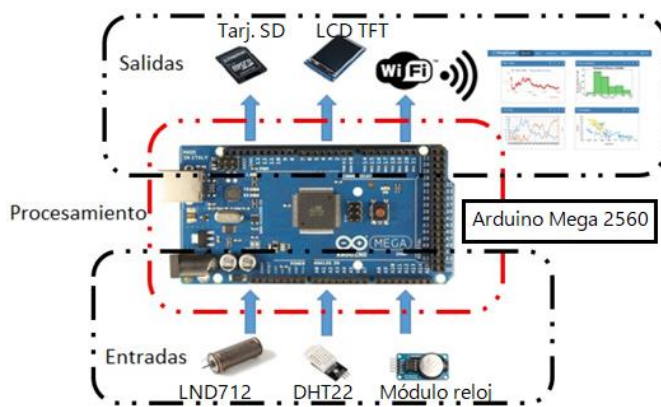


Fig. 1. Diagrama de bloques del prototipo de Contador Geiger Müller construido

Dicho esquema sintetiza la distribución del equipo construido.

Para el procesamiento se utiliza:

una tarjeta de desarrollo Arduino, con un microcontrolador ATmega 2560 (Open Source), con voltaje de operación de (5V), voltajes de entrada entre (6 – 20 V), está conformado con 54 pines digitales y 16 análogos, los cuales están dispuestos para los dispositivos de entrada y salida [14].

El tubo Geiger Müller utilizado es un LND 712, el gas interno es de Ne + Halogen, funciona a un rango de temperatura de -40 a 75 °C y voltaje recomendado de 500 V, va acompañado de una fuente de alto voltaje que proporciona una alta confiabilidad hasta 1 mSv/h (1000 μ Sv / h), además la placa consume muy poca corriente en segundo plano. De acuerdo a las referencias del fabricante LND INC [15].

Para cada valor entregado por el sensor LND 712, se divide entre 108 cuentas por minuto que corresponde al factor de conversión dado por el cobalto 60 a 1 μ Sv/h, es almacenado en una micro SD de 8 Gb junto con la fecha con el sensor Rtc Ds3231, es un módulo de reloj sencillo y la comunicación es a través de la interfaz I2C, también la temperatura que tiene un rango de medición entre -40 a 80 °C, con una precisión de ± 0.5 °C y porcentaje de humedad relativa proveniente de un sensor capacitivo, con una precisión de 2%, la referencia es DHT22 el cual se considera de buen rendimiento y bajo costo, utilizando un pin digital, opera entre 3 a 6 V [16].

Como salida de los datos se cuenta con una pantalla LCD (TFT 320x240 px) de 16 bits [17], donde se puede apreciar los valores en tiempo real de cuentas por minuto, dosis, hora, fecha, temperatura y humedad Figura 2, que al mismo tiempo se van almacenando en una tarjeta sd para recuperar la información desde un dispositivo de computo.

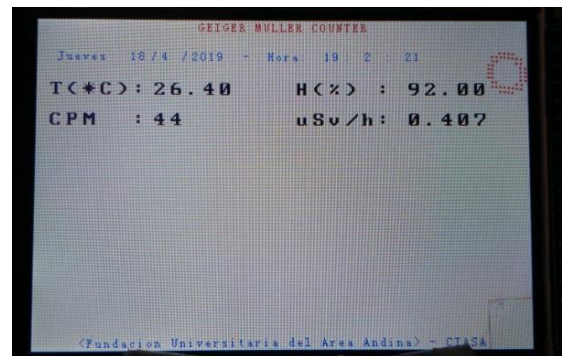


Fig. 2. Pantalla LCD de visualización en tiempo real

B. Métodos

En la programación de la tarjeta de desarrollo se hace a través del software del fabricante Arduino IDE, el cual es un editor de texto y compilador para programar y transferir contenido con las instrucciones que se dan hacia la tarjeta Arduino, que posee gran cantidad de referencias adaptables a diferentes aplicaciones, por su puesto implementando el lenguaje máquina, en este software se utiliza el lenguaje de programación Processing.

Además de la sencillez en la estructuración del código, existen una gran cantidad de librerías que se adaptan a diferentes necesidades, por ejemplo, se usa RTCLib.h, SD.h y Wire.h que reduce tiempo a la hora de ejecutar diferentes proyectos.

El contador GM posee una de transmisión de datos en tiempo real, gracias a la tarjeta de transmisión WIFI Esp8266 que ofrece una solución completa y autónoma de redes, dichos datos son enviados al servidor de ThingSpeak figura 3, que recopila datos en la nube con la opción de realizar análisis avanzados

usando MATLAB para proyectos de IoT, en esta sección del equipo fue necesaria una alimentación de 5V por esta razón se implementa un regulador de voltaje Lm 2596 y una batería extra de 9V, con el fin de suplir las aplicaciones de visualización adaptadas de pantalla y transmisión.

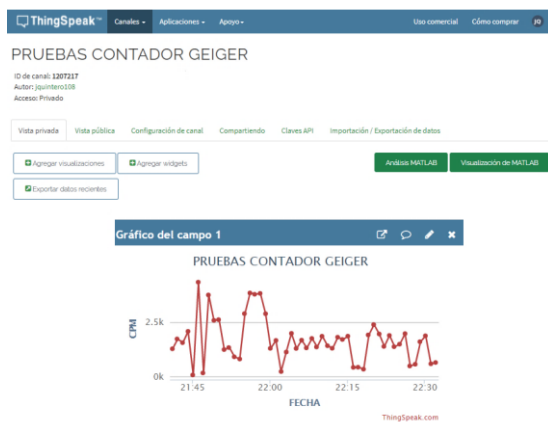


Fig. 3. Plataforma de visualización ThingSpeak

III. RESULTADOS

Los Contadores Geiger (GM) son instrumentos destinados a detectar y medir radiación ionizante, particularmente útiles en la inspección de áreas y/o personal. Una lectura errónea puede conducir a una sobreexposición o inadecuada lectura del informe dosimétrico y es por ello importante lograr un alto nivel de confianza en el instrumento de medición [18]. Es uno de los instrumentos científicos más conocidos que se han desarrollado durante las primeras investigaciones sobre la radiactividad, fue uno de los primeros dispositivos eléctricos que detectaron las radiaciones alfa (α) y beta (β) [19].

Basado en la simplicidad de diseño y bajo costo, el detector GM es la mejor opción para un sistema de conteo simple y económico, por su fácil uso y adaptación a diferentes sistemas. Hoy en día, tales aplicaciones son posibles, ya que los sensores incorporados están fácilmente disponibles o se pueden construir fácilmente desde hardware fuera de los estantes (como las plataformas Arduino), un ejemplo práctico son las redes de sensores, donde los nodos de sensores pueden proporcionar datos, ya sea de forma automática o bajo demanda [20].

El contador GM al ser adaptado con un Arduino, el cual es una plataforma de creación de prototipos de código abierto basada en hardware y software fáciles de usar. Debido a la conveniencia de la arquitectura abierta y las bibliotecas de códigos; Una placa Arduino consiste en un microcontrolador Atmel AVR con componentes complementarios y conectores estándar. Los conectores estándar permiten que el usuario conecte la placa del controlador a una variedad de módulos adicionales que normalmente se conocen como blindajes. Más de dos escudos podrían apilarse en la placa del controlador y usarse en paralelo. Las opciones de protección de Arduino son casi infinitas, desde pantallas hasta sensores, actuadores e incluso pantallas de comunicación como GSM, Wi-Fi, Bluetooth y Zigbee. Por lo tanto, Arduino es una herramienta

ideal para el desarrollo rápido de diseños y la creación de prototipos de productos [33], este tipo de instrumentos permiten una adaptación adecuada de casi cualquier tipo de sensor entre estos el LND 712 tubo GM comercial, que permite lograr el montaje de un equipo de medición de radiación portátil como se muestra en la figura 4 útil para la implementación en salas de radiología convencional.



Fig. 4. Contador Geiger Müller construido

En el desarrollo del prototipo se realiza el proceso de integrar las diferentes tecnologías mencionadas, cuya adaptación resulta en la construcción de un contador Geiger Müller digital, el cual tiene propiedades que mejoran los ofrecidos en el mercado actual, los cuales además de tener precios elevados, necesita que la persona que toma la medida esté presente en el sitio exponiéndose a las radiaciones emitidas.

Dentro de las características a resaltar del equipo de medición se tiene, el poder realizar mediciones en tiempo real y transferirlas de manera remota, sin exponer al profesional encargado de la vigilancia del manejo de estas radiaciones en las diferentes instituciones prestadoras del servicio, como se mostraba en la figura 1, las salidas en su variedad dan la versatilidad para suplir diferentes alternativas en el tratamiento de datos, desde el almacenamiento en tarjeta SD para su posterior análisis, visualización en pantalla con el fin de estar alerta de la correcta operatividad del equipo y la que se considera más relevante, siendo la opción de visualizar las mediciones desde cualquier equipo de cómputo o celular, teniendo acceso a la plataforma destinada para la transferencia de los datos en tiempo real.

Con el desarrollo de la investigación se logra integrar la ya mencionada tarjeta de desarrollo arduino, la cual permite la cooperación de profesionales de diferentes disciplinas para proponer códigos que satisfagan las diferentes necesidades en las tantas áreas de actuación que tiene. El código implementado en la propuesta de investigación se desarrolló en su totalidad por parte del ingeniero programador integrante del equipo de trabajo, tomando como referencia las diferentes librerías que posee la tecnología de arduino y su plataforma de programación.

El prototipo construido se pone en operación en la IPS dedicada al diagnóstico por imagen especializado en medicina nuclear, ecografía (ultrasonido), mamografía y radiología convencional (esta última hace alusión a la realización de procedimientos de rayos X básicos), dicha entidad está ubicada en la ciudad de Pereira. Las pruebas piloto toman como referencia los horarios en los cuales se encuentra el equipo de rayos X en funcionamiento. Ubicando el prototipo Geiger en el área no controlada a distancias diferentes de la fuente como se muestra en la figura 5, comprobando su funcionamiento y contrastando los resultados con el equipo patrón (contador Geiger marca Ludlum 14c) con el que cuenta la sala donde se realizaron las pruebas.

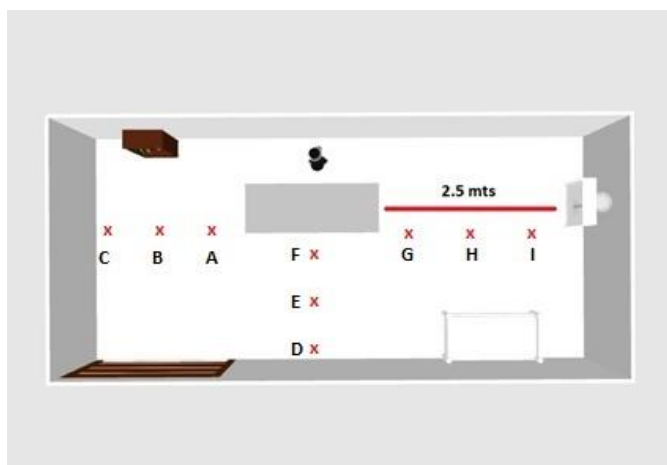


Fig. 5. División de la sala de radiología convencional

Los resultados de las pruebas realizadas en ambos equipos se midieron en cuentas por minuto (CPM). A los datos obtenidos se les aplica análisis descriptivo de (media, Desviación estándar, valor máximo y mínimo), además se obtiene la incertidumbre estándar y el error relativo de cada equipo. Como se indica en la tabla 2. En los resultados se puede observar que el porcentaje del error relativo entre los dos equipos presenta una diferencia del 2,44%. Para obtener el valor de la incertidumbre estándar se utiliza la ecuación de la evaluación tipo A (1) [21].

$$u_{(xi)} = \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2} \quad Ec. 1$$

donde \bar{q} :Media de los resultados individuales.

TABLA II
ANÁLISIS DESCRIPTIVOS PARA LOS RESULTADOS DEL EQUIPO CONSTRUIDO Y EQUIPO PATRÓN

Medidas	Equipos	
	Prototipo	Patrón
Media	1720,7	1327,65
DS	961,04	722,81
Mínimo	176	150
Máximo	4340	3100
Incertidumbre Estándar	134,57	101,21
% Error Relativo	40,63	38,19

DS = Desviación Estándar.

Posteriormente se procede a establecer el porcentaje del error entre cada una de las medidas obtenidas contrastando el valor entregado por el prototipo con respecto al del equipo patrón como se indica en la figura 6, encontrando un valor medio del porcentaje del error entre los dos equipos del 22,20%, DS 9,04%, valores mínimos y máximos comprendidos entre el 1,81% 37,62% respectivamente

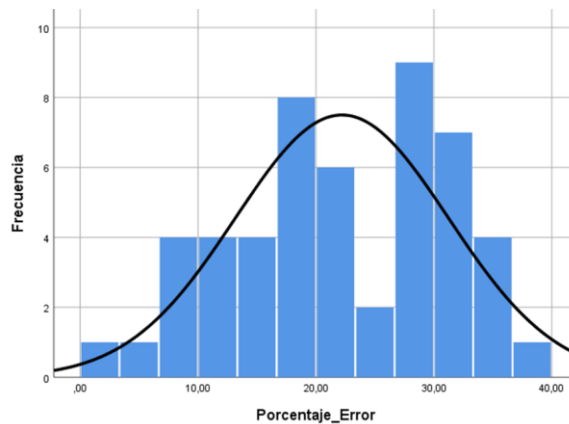


Fig. 6. Pruebas en sala de radiología convencional

Finalmente se muestra los resultados arrojados por ambos equipos durante un mes con tomas de datos por 3 días a la semana donde se observa que el prototipo registra la información datos cercanos al equipo patrón figura 7, con un error bajo, permitiendo establecer el correcto funcionamiento del equipo y abriendo la puerta a la segunda fase de validación con un equipo patrón en un laboratorio especializado en la calibración de dichos instrumentos de medición.

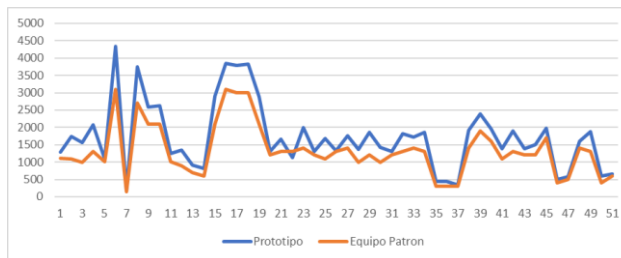


Fig. 7. Pruebas en sala de radiología convencional

IV. DISCUSIÓN

La tecnología open source posee elementos versátiles que pueden ser adaptados a innumerables aplicaciones, como en la actual investigación siendo una solución al monitoreo y vigilancia de las radiaciones ionizantes, son muchas las alternativas para el aprovechamiento de las herramientas en mención, así como lo muestra [22] en su trabajo, teniendo un enfoque pedagógico donde a través de tecnología de acceso libre construyen un módulo de enseñanza en el campo de la física básica logrando resultados favorables y comprensibles para sus estudiantes, validando el funcionamiento de su prototipo y la efectividad de la tecnología.

Con los resultados obtenidos y después de realizar algunos ajustes procedentes a la validación y certificación del equipo, el cual con mediciones exactas reduciría considerablemente los riesgos de los trabajadores ocupacionalmente expuestos y pacientes, al permitir mediciones de forma remota y entregando información en tiempo real, además de fortalecer las condiciones laborales de los profesionales de la salud que se encuentran en constante exposición.

En el ámbito social una de las soluciones con la implementación del prototipo conduciría no solo a la generación de una herramienta al director técnico encargado de monitorear y vigilar los centros donde se trabajan con equipos médicos especializados que generan radiación, sino además a través de nuevas propuestas de monitoreo para que los entes gubernamentales reguladores de dichas instituciones, cuenten con un insumo de vigilancia que le permita emitir los permisos de operación de una manera más idónea, garantizando la integridad de los profesionales convirtiéndose en un factor determinante en la detección a tiempo de sobreexposiciones de los mismos.

Se busca que al llevar el registro de los valores emitidos se pueda verificar que estén enmarcado en los niveles estipulados por las normas internacionales, como se menciona en [23] donde se plantea una metodología de vigilancia en salud del trabajador en la atención primaria, validando los riesgos entre otros la exposición a la que se encuentran en sus jornadas laborales.

Teniendo en cuenta que los instrumentos de medida actuales como lo son los dosímetros personales arrojan resultados tardíos causando un retraso en la detección de la sobreexposición de los TOE, así mismo se corre el riesgo que durante el mes de operación que tienen recolectando datos en sus dosímetros personales, puedan perderse por una avería del equipo, perdiéndose la información y el historial de dosis absorbidas por el profesional, conllevando a una afectación directa hacia la integridad del profesional en salud, en el estudio [24] donde se realiza un estudio de la vigilancia a la exposición de radiaciones ionizantes y su comparativo con las referencias que se deben tener anuales sin superar un límite anual establecido.

Al calcular los errores relativos de ambos equipos, se puede observar que sus valores no fueron tan bajos, pero al comparar dichos resultados se encuentra una diferencia del 2,44% entre ellos, es decir que el prototipo arroja valores similares al equipo patrón que se tiene como referencia, lo que permite validar el funcionamiento del equipo, además de evidenciar el correcto

funcionamiento de las características del mismo que lo hacen innovador en el campo de aplicación; como se menciona en [25], donde realizan un estudio para validar un prototipo de una maquina para ensayo de resistencia de materiales a través de un estudio comparativo con un equipo patrón siendo una maquina universal de ensayos, allí se valida el funcionamiento encontrando que los equipos presentan valores diferentes, sin embargo dichos valores están comprendidos entre rangos muy cercanos.

La estructura del prototipo tiene un diseño que permite ser asequible por el bajo costo de sus componentes, siendo un valor agregado para el laboratorio donde este opere, ya que dado su control en los niveles de radiación les permite estar al día en la reglamentación y acceder sin problemas a sus respectivas licencias para su operación, así mismo lo plantea en [26] donde plantean una solución en dosimetría en tiempo real en el ambiente hospitalario a través de tecnología de bajo costo y desarrollo libre, encontrando resultados óptimos y viables para la aplicación en la protección de los trabajadores expuestos.

Finalmente, y después de realizar un análisis de las alternativas en el estudio, es pertinente mencionar que el monitoreo de la emisión de la radiación ionizante, permite dar alertas tempranas cuando se esté afectando no solo el ambiente en el que opera, sino además de verificar que las personas que realicen actividades en lugares aledaños tengan la seguridad de hacerlo en las condiciones idóneas.

V. CONCLUSIONES

El prototipo desarrollado se logró construir en interface de código abierto, utilizando tarjeta de desarrollo libre Arduino y sensor de radiación ionizante LND 712, obteniendo resultados positivos en las mediciones. Se requieren realizar pruebas adicionales para verificar los resultados a partir de equipo patrón especializado y que genere un certificado para la puesta en operación del prototipo construido.

Es importante tener presente que es el primer prototipo para radiaciones ionizantes construido por el grupo de investigación, con el análisis de las condiciones actuales de funcionamiento del mismo se plantea realizar ajustes, experimentado con sensores de radiación ionizante alternativos diferentes al utilizado, explorando las diferentes alternativas tecnológicas que conlleven a obtener exactitudes y precisiones altas en las medidas que este tome.

Al validar el prototipo con el equipo patrón con el que contaba la IPS se puede comprobar su funcionamiento encontrando rangos similares en las medidas registradas, cabe aclarar que los errores porcentuales entre cada una de las medidas, fueron encontrados con un promedio del 22,2%, variando entre el 1,81% al 37,62%, dicho fenómeno se explica debido a que las mediciones registradas, por la variedad de exámenes que realiza la institución hace que fluctúen bastante los registros tomados en los diferentes instantes de tiempo que estuvieron los equipos expuestos en el área no controlada de la sala.

Teniendo en cuenta que el contador Geiger Müller al ser un

instrumento de medición comercial, de los más utilizados en la actualidad para medir la radiación a la que se exponen el personal que labora en los diferentes ambientes, donde las fuentes de radiación artificial se implementa con fines médicos; dicho contador GM busca la validación ante el ente regulador como lo es entre otros, el ministerio de minas y energía, para obtener un instrumento de medición que permita llevar un monitoreo y control, trabajando bajo la reglamentación local como la resolución 482 del 2018, además las normas internacionales dadas según la ICRP, ICRU, UNSCEAR, IAEA, que establecen los límites permitidos y tolerados, conservando la integridad del ser humano.

VI. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Fundación Universitaria del Área Andina por el apoyo financiero dado para la realización del proyecto de investigación y al centro Tecno Vida que facilitó sus instalaciones para realizar las diferentes pruebas pilotos con el equipo.

REFERENCIAS

- [1] I. Castro-volio, "Indicadores citogenéticos para la identificación de exposición a radiación ionizante en humanos," *Acta Med. Costarric.*, vol. 55, no. 3, pp. 110–117, 2013, Accessed: Sep. 02, 2019. [Online]. Available: https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0001-60022013000300002.
- [2] L. R. Arias, J. Uribe, and C. Resumen, "El Contador Geiger como Herramienta en la Enseñanza del Concepto de Radiación," vol. 2, pp. 1–3, 2007.
- [3] M. Crispín *et al.*, "Quantification of the absorbed doses by means of dosimetry thermoluminescent in dental radiology," *Rev. Odontológica Mex.*, vol. 14, no. 4, pp. 231–236, 2010, Accessed: Sep. 02, 2019. [Online]. Available: <https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumenI.cgi?IDARTICULO=25289>.
- [4] SIEVERT, "Institut de Radioprotection et de Surete Nucleaire." <https://www.sievert-system.org/> (accessed Dec. 01, 2018).
- [5] M. Donya, M. Radford, A. Elguindy, D. Firmin, and H. Magdi, "Radiation in medicine: Origins, risks and aspirations," *Glob. Cardiol. Sci. Pract.*, vol. 2014, no. 4, p. 57, 2014.
- [6] P. de las N. U. para el M. Ambiente, *Radiación efectos y fuentes.*
- [7] ICRP, "International Commission on Radiological Protection." <http://www.icrp.org/> (accessed Dec. 01, 2018).
- [8] ICRU, "International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU)." <https://icru.org/> (accessed Dec. 01, 2018).
- [9] UNSCEAR, "United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation." <http://www.unscear.org/> (accessed Dec. 01, 2018).
- [10] IAEA, "Organismo Internacional de Energía Atómica | Átomos para la paz y el desarrollo." <https://www.iaea.org/es> (accessed Dec. 01, 2018).
- [11] D. Ginzburg, "Ionisation chamber for measurement of pulsed photon radiation fields," *Radiat. Prot. Dosimetry*, vol. 174, no. 3, pp. 297–301, 2017, doi: 10.1093/rpd/nw145.
- [12] O. García, A. I. Lamadrid, L. Morera, and T. Mandina, "Introducción y desarrollo de la dosimetría biológica en Cuba," *Panor. Nucl.*, vol. 37, pp. 49–53, 2005, [Online]. Available: <http://files.sld.cu/chemobil/files/2009/05/introduccion-y-desarrollo-en-la-dosimetria-biologica-en-cuba.pdf>.
- [13] J. Azpeitia Armán and J. P. Domingo, *Manual para técnico superior en imagen para el diagnóstico y medicina nuclear*. Madrid: Editorial Médica Panamericana, 2016.
- [14] "Arduino Mega 2560 Datasheet."
- [15] "712 - LND | Nuclear Radiation Detectors Datasheet." <https://www.lndinc.com/products/geiger-mueller-tubes/712/> (accessed Apr. 30, 2021).
- [16] "DHT22 Temperature Sensor Datasheet." <https://datasheetspdf.com/pdf/792209/ABCPROYECTOS/DHT22/1> (accessed Apr. 30, 2021).
- [17] "Pantalla LCD TFT Datasheet." <http://solectroshop.blogspot.com/p/iii-programar-una-calculadora-tactil-en.html> (accessed Apr. 30, 2021).
- [18] G. Peretti, E. Romero, M.; Cejas, and C. Marqués, "Diseño De Un Contador Geiger Con Capacidad De Autoverificación Integrada," [Online]. Available: <http://www.iberchip.net/VII/cdnv/pdf/p7.pdf>.
- [19] S. Korff, "How the Geiger Counter started to crackle: Electrical counting methods in early radioactivity research," *Ann. Phys.*, vol. 525, no. 6, pp. 88–92, 2013, DOI: 10.1002/andp.201300726.
- [20] C. Pham, "Communication performances of IEEE 802.15.4 wireless sensor motes for data-intensive applications: A comparison of WaspMote, Arduino MEGA, TelosB, MicaZ and iMote2 for image surveillance," *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 46, pp. 48–59, 2014, doi: 10.1016/j.jnca.2014.08.002.
- [21] L. E. Llamosa, J. Gómez, and A. F. Ramírez, "Metodología Para La Estimación De La Incertidumbre En Mediciones Directas," *Sci. Tech.*, vol. XV, no. 41, pp. 384–389, 2009, doi: 10.22517/23447214.2927.
- [22] P. Patiño Gallego, J. Padóan, R. Benavides, A. Tapia, and D. Martínez Caicedo, "Detección de partículas a nivel de educación básica usando hardware y software libre," *Rev. Mex. Física*, vol. 18, no. 1, pp. 56–62, 2020.
- [23] G. Pupo, J. Cristóbal, C. Senra, P. Hernández, A. Lucila, and C. Ali, "Metodología de vigilancia en salud del trabajador en la atención primaria," *Ciencias Holguín*, vol. 13, no. 1, pp. 1–12, 2008.
- [24] F. Tomasina *et al.*, "Surveillance of the exposure to ionizing radiations of the university health staff," *Rev. Cuba. Salud Publica*, vol. 36, no. 1, pp. 119–127, 2010, DOI: 10.1590/s0864-34662010000100012.
- [25] D. Durango, E. Herrera, and N. Otero, "Diseño, construcción y validación del prototipo de una máquina para ensayos de resistencia de materiales," *Ing. e Innovación*, vol. 3, no. 2, pp. 16–27, 2015.
- [26] A.-J. Garcia-Sanchez, E. A. Garcia Angosto, P. A. Moreno Riquelme, A. Serna Berna, and D. Ramos-Amores, "Ionizing Radiation Measurement Solution in a Hospital Environment," *Sensors (Basel)*, vol. 18, no. 2, Feb. 2018, DOI: 10.3390/s18020510.

Andrés Arismendi Ramírez. (M'84) Was born in Pereira, Risaralda, Colombia. He received the B.S. in physical engineering from the Technological University of Pereira, Colombia, in 2010. Specialist degree in pedagogy and teaching from the Fundación Universitaria del Área Andina, in 2017. He is currently pursuing the M.S. degree in data science and mass data processing (Big data) at the Cuauhtémoc. Full professor of basic science department at the Fundación Universitaria del Área Andina. Member of the research group GIEE
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6578-5107>

Jorge Luis Quintero López. (M'87) Was born in Armenia, Quindío, Colombia. He received the B.S. in physical engineering from the Technological University of Pereira, Colombia, in 2010. Specialist degree in Bioengineering from the Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, in 2014. He is currently pursuing the M.S. degree in data science and mass data processing (Big data) at the Cuauhtémoc. Halftime professor of the radiology program's health faculty at the Fundación Universitaria del Área Andina. Member of the research group ASEPTICOS.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0816-1592>

Ángela Liceth Pérez Rendón. Was born in Águila, Valle, Colombia. He received the degree in mathematics and physics from the Technological University of Pereira, Colombia, in 2006. MS. degree in Operational and Statistical Research from the Technological University of Pereira, Colombia, in 2016. Full professor of basic science department at the Fundación Universitaria del Área Andina. Member of the research group GIEE

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2363-8782>

Jimmy Enrique Perea Moreno. Was born in Choco, Pacífico, Colombia. He received the technology in the radiology and diagnostic images from the Fundación Universitaria del Área Andina, in 2002. He is currently pursuing the B.S in law at the Fundación Universitaria del Área Andina. Full professor of the radiology program's health faculty at the Fundación Universitaria del Área Andina. Member of the research group ASEPTICOS.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0854-5772>