

Desarrollo de una mini fuente de rayos X para el estudio de detectores de radiación

Rosas Juan E (1), Córdoba Alfaro, Rocío Irais(2), Agudelo González, Sandra Milena (3),
Aldana Segura, Magdalena Waleska (4) Félix Valdez, Julián (5)

1. [Licenciatura en ingeniería física, Universidad de Guanajuato] | Dirección de correo electrónico: [je.rosastrujillo@ugto.mx.]
2. [Licenciatura en ingeniería física, Universidad de Guanajuato] | Dirección de correo electrónico: [ri.cordovaalfaro@ugto.mx.]
3. [Licenciatura en física, Universidad Distrital Francisco José de Caldas] | Dirección de correo electrónico: [smagudelog@correo.udistrital.edu.co]
4. [Escuela de Formación de Profesores, Universidad de San Carlos de Guatemala] | Dirección de correo electrónico: [waldanasegura@profesor.usac.edu.gt.]
5. [Departamento de física, División de ciencias e ingenierías, Campus León, Universidad de Guanajuato] | Dirección de correo electrónico: [felix@fisica.ugto.mx]

Resumen

Los rayos X, como técnica de diagnóstico y herramienta de exploración de la naturaleza, tienen muchas aplicaciones en todas las ciencias naturales, la medicina, y en algunas tecnologías. Los rayos X se producen mediante el frenado de electrones previamente acelerados, en fuentes de diferentes energías que dependen de la aplicación buscada. Mini fuentes de rayos X, de baja energía, son usadas con fines educativos, y en pruebas y calibración de detectores de radiación.

Hemos planeado, diseñado, construido, caracterizado y operado una mini fuente de rayos X de baja energía para fines educativos y de investigación de pequeños detectores de radiación.

Presentamos detalles de la planeación, el diseño, la construcción y la caracterización, operación y resultados físicos preliminares de una mini fuente de rayos X construida con materiales comunes y operada a bajas energías. El nivel de radiación alcanzado es de 1000Bq, posiblemente de rayos X y rayos beta, por arriba del nivel de ruido de los rayos cósmicos.

Abstract

X rays, as a diagnostic technique and as a tool to explore nature, have many applications in all of the natural sciences, medicine and in some technologies. X rays are produced by means of stopping electrons, which have previously been accelerated, on different energy sources depending on the sought application. Low energy, Mini X rays sources, are used for educational goals, and on calibration tests for radiation detectors.

We have planned, designed, built, characterized and operated a low energy mini X ray source for educational and research of small radiation detectors goals.

We present planning details, design, built and characterization, operation and preliminary physical results of a mini X ray source, developed with common materials and operated at low energies. The radiation level reached is of 1000Bq, possibly from X rays and beta radiation, above the level of noise of the cosmic rays.

Palabras Clave

Radiación ionizante, Rayos X, mini fuente de rayos X, detectores de radiación.

INTRODUCCIÓN

Es una evidencia experimental que cuando una carga eléctrica es acelerada, emite radiación electromagnética, de diferentes longitudes de onda, o frecuencias. La frecuencia o longitud de onda, de la radiación emitida, depende de la energía que la partícula cargada incrementa -aceleración positiva- o decremente -aceleración negativa-.

La radiación por frenado, desaceleración, es una técnica muy común para producir radiación de tipo X. Consiste en acelerar electrones mediante un campo eléctrico y desacelerarlos bruscamente, al estrellarlos contra una pared delgada de un material como vidrio. En este proceso se producen fotones de diferente longitud de onda.

La probabilidad de pérdida de energía por unidad de longitud de frecuencia de electrones con energía E , en la producción de fotones de energía $h\omega$ es

$$\frac{d\chi_{NR}}{d\omega} \cong \frac{16 Z^2 e^2}{3 c} \left(\frac{Z^2 e^2}{Mc^2} \right) \frac{1}{\beta^2} \ln \left[\frac{\lambda' (\sqrt{E} + \sqrt{E - h\omega})^2}{h\omega} \right] \quad 1.$$

Ecuación de Bethe Heitler. NR significa no relativista, es decir, válida a velocidades mucho menores que la velocidad de la luz en el vacío. Para una explicación de los términos y condiciones donde se cumple ver Ref. [1].

De esta manera, podemos estimar la probabilidad de producción de los fotones salientes cuando la energía de los electrones es E . Es decir,

$$\int_0^\omega \frac{d\chi_{NR}}{d\omega} d\omega \quad 2.$$

En base a lo anterior, planeamos, diseñamos, construimos y caracterizamos una mini fuente de Rayos X a base de electrones acelerados mediante un pulso eléctrico y estrellados contra una pared delgada de vidrio, y detectamos y medimos la radiación saliente.

MATERIALES Y MÉTODOS

La mini fuente de rayos X fue desarrollada en el laboratorio de partículas elementales de la Universidad de Guanajuato, en el Campus de León, durante la XXVI estancia de investigación de Verano de la Ciencia con el propósito de utilizarse para caracterizar pequeños detectores de radiación. Para ello se realizaron las siguientes etapas:

- **Planeación**

Es una fuente pequeña –a lo más de 2.54 cm x 2.54 cm x 7.5 cm-, para operarse a baja energía, colimada, de bajo costo, segura, de materiales comunes, etc. La fuente tendrá la forma de un paralelepípedo.

Se usará un tubo de aluminio comercial, con sección transversal cuadrada, de 1mm de espesor, como contenedor de un foco incandescente, pequeño, usado como generador de electrones.

Se genera un campo eléctrico entre dos electrodos -el positivo conectado al filamento y el negativo conectado al vidrio del foco- con una lámina de cobre perforada circularmente en su centro geométrico y unida coaxialmente al frente de la bombilla del foco, electrificada negativamente con el propósito de mandar a tierra los electrones liberados de la resistencia de tungsteno, dentro de la bombilla, por efecto de la termo ionización, donde estos se impactarán con la superficie de este foco, produciendo posiblemente rayos X.

El alto voltaje se produce con un transformador alimentado con una fuente de voltaje, de voltaje y corriente eléctrica variables.

El bajo voltaje, para alimentar el filamento del foco y producir los electrones por termo ionización, se produce con una fuente externa de voltaje y corriente variables.

El control del funcionamiento se hará electrónicamente. El foco y la lámina de cobre estarán conectadas a un circuito de control para alternar el encendido de estos.

- **Diseño**

Se establecieron varios elementos a partir de los diseños propuestos por los participantes, y se tomaron elementos de cada uno para el diseño final. Mostramos cada uno de los diseños.

Este diseño utiliza una arandela de cobre, la base del bombillo y el perfil de aluminio con una ranura para colocar la placa de cobre. La ventana es de material acrílico para asegurar el paso de la radiación generada.

Ilustración 1.

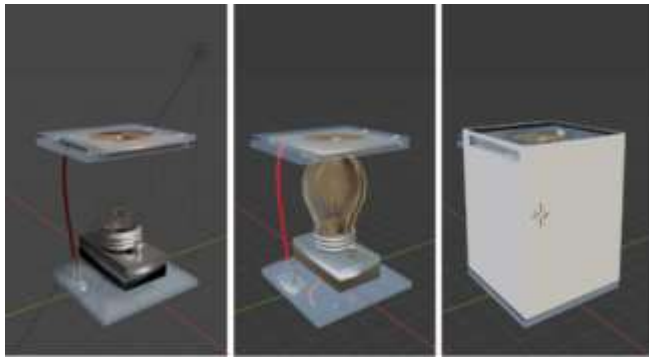


Ilustración 1 Primera opción de diseño (elaboración propia en Blender [2]).

En esta propuesta se usan bases diseñadas para soportar el foco.

Ilustración 2.

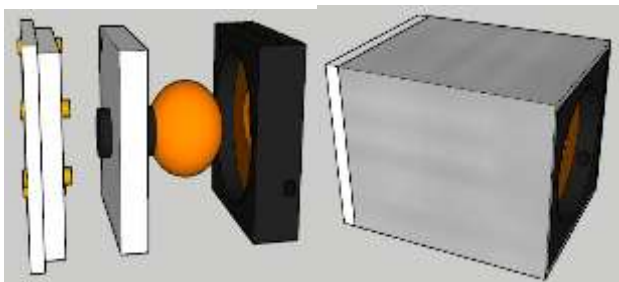


Ilustración 2 Segunda opción de diseño (elaboración propia en Sketchup [3]).

En este diseño se utiliza una base E10 de foco, la placa de cobre y las conexiones se realizan en la base del bombillo.

Ilustración 3.



Ilustración 3 Tercera opción de Diseño (elaboración propia en Solidworks[4]).

El siguiente diseño consta de un foco de 1 cm el cual contiene el filamento de tungsteno que está al

vacío, y en donde se producen los electrones. Este foco de vidrio tiene un espesor de $\frac{1}{3}$ de milímetro. Para el campo eléctrico, el diseño es una argolla de cobre con un orificio circular de 3 milímetros, esta estará dentro de una base cuadrada de plástico impresa en 3D, que fungirá como tapa también del dispositivo, la otra tapa será de acrílico y con geometría cuadrada de una pulgada por arista, y espesor de 4mm. Con la propuesta de 4 pines, 2 equidistantes donde serán las conexiones del bajo voltaje (para el foco) y el alto voltaje (campo eléctrico) respectivamente. El sistema se encuentra dentro de un tubo rectangular de aluminio de una pulgada por arista en la cara y de 5 cm de largo. Ilustración 4.

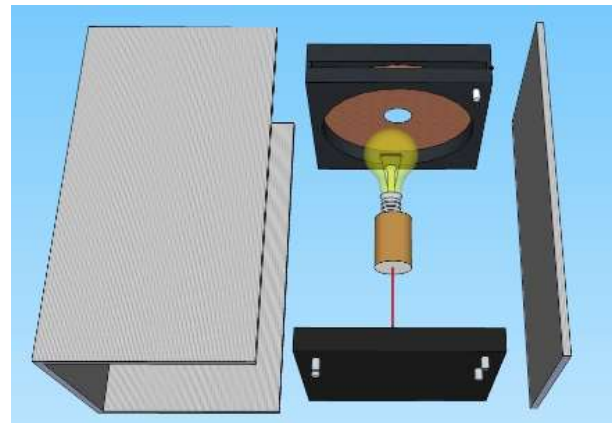


Ilustración 4 Propuesta de diseño elaborada en Sketchup (elaboración propia [3]).

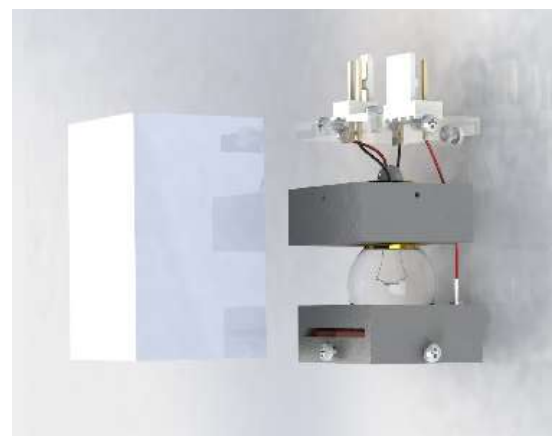


Ilustración 5 Vista del diseño propuesto (elaboración propia en Solidworks [4]).

En la siguiente ilustración se puede ver la ventana del dispositivo, la placa de cobre perforada, la base de plástico y los tornillos de sujeción. Ilustración 6.

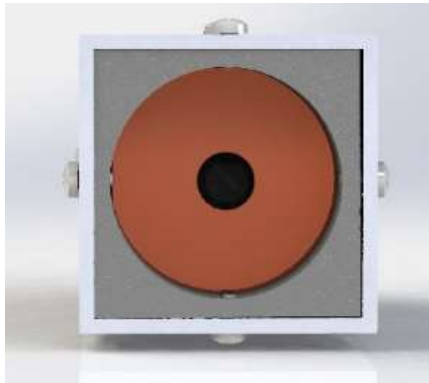


Ilustración 6 Vista frontal del Diseño experimental (elaboración propia en Solidworks [4]).

En esta vista se aprecia el ensamblaje, con la base del bombillo, la tapa trasera y la tapa frontal con la lámina de cobre. Ilustración 7.

Se planea imprimir en 3D las diferentes piezas de plástico y de acrílico. La inserción de estas piezas a la base de la mini fuente de rayos X es por a parte frontal y la parte posterior.

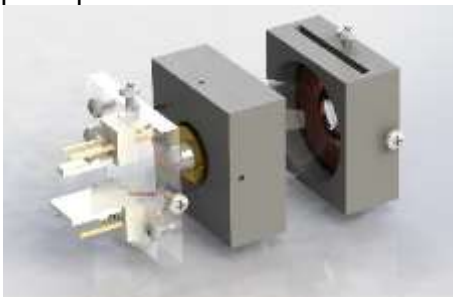


Ilustración 7 . Vista lateral que muestra los conectores y el bombillo (elaboración propia en Solidworks [4]).

En esta otra vista se puede apreciar las conexiones de los pines al foco. Ilustración 8.

En la vista de la tapa posterior se aprecian los pines colocados, tanto de alto voltaje como bajo voltaje para operar el dispositivo.



Ilustración 8 Vista de la tapa posterior con los conectores (elaboración propia).

Por medio del reconocimiento de la operación, funcionamiento y creación de cada uno de los modelos se desarrolló un diseño final que cumpliera con los objetivos planteados, como dimensiones de la fuente, materiales de fácil acceso y cuidado en detalle de las conexiones, condiciones de seguridad.

- **Construcción**

Se seleccionó un perfil de Aluminio de una pulgada de lado, comercialmente disponible, de 7 cm de longitud, y 1 mm de espesor. Esto facilita la manipulación, aislamiento (tanto óptico, eléctrico y de radiación) del dispositivo.

Durante el proceso de construcción se elaboraron piezas en el laboratorio de partículas elementales, así como piezas en plástico extruido, impresión 3D.

Se maquinó una pieza de cobre y una base de acrílico con la base del bombillo utilizado.

Se ajustaron los pines de conexión para asegurar fueran los apropiados para los voltajes utilizados y que todo el sistema estuviera apropiadamente aislado eléctricamente.

Se ajustaron las piezas con masilla epóxica para asegurar el ajuste y se utilizó aislante térmico líquido para asegurar el aislamiento y evitar arcos y descargas en el dispositivo.

Se utilizó la base de conexión de un bombillo E10, comercialmente disponible para asegurar atornillar apropiadamente el bombillo a la base acrílica.

La tapa acrílica trasera fue perforada para ajustar los pines de conexión y se hicieron perforaciones para ajustar con tornillos y asegurar la misma con el perfil de aluminio.

Ilustración 9.

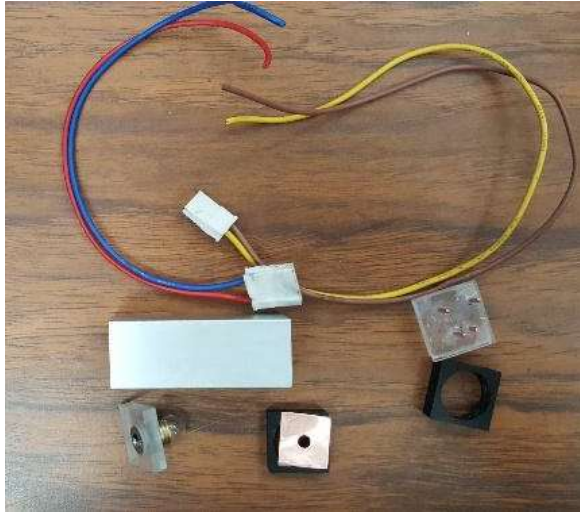


Ilustración 9 Elementos de la mini fuente de rayos X.

• **Caracterización**

La fuente de alto voltaje alimenta al transformador y la de bajo voltaje alimenta al bombillo.

Para la medición del alto voltaje, salida del transformador, se utilizó un divisor de voltaje, constituido por dos resistencias. Ver ecuación 3.

$$V = V_1 \frac{(R_1 + R_2)}{R_1} \quad 3.$$

Ilustración 10.

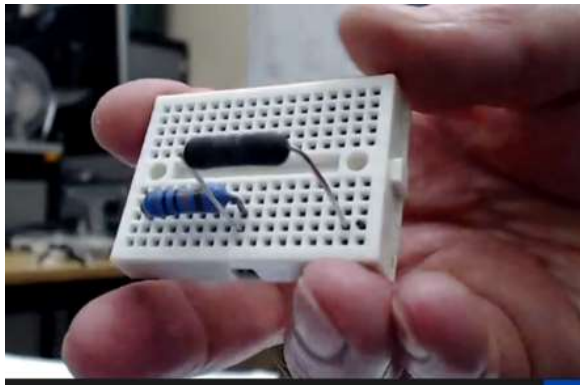


Ilustración 10 Fotografía del divisor de voltaje.

Se utilizaron dos resistencias, una de $R_1=51\Omega$ y otra de $R_2 = 510 \text{ k}\Omega$. La relación entre voltajes medidos en R_1, V_1 , y el voltaje medido en R_2, V_2 , se muestra en la ilustración 11.

Para el bajo voltaje utilizamos una fuente Dr. Meter [5] y para el alto voltaje utilizamos un transformador B07PB27NTV.

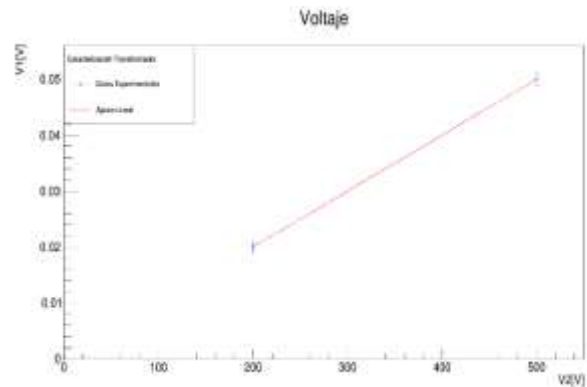


Ilustración 11 Voltaje de caracterización del transformador (elaboración propia en ROOT [6]). Relación voltaje V_1 a voltaje v_2 .

Se realizaron pruebas con Arduino MEGA 2560 para establecer una electrónica de control apropiada para el proceso de alternar entre la fuente de alto voltaje y la fuente de bajo voltaje.

Operación

El sistema experimental por medio de un diagrama de bloques se ilustra en la Ilustración 12. Ilustración 12.

Este sistema cuenta con una electrónica de control asociada al sistema para que pueda alternar entre los voltajes aplicados al bombillo y a la fuente de campo eléctrico. Todo se controla con una laptop.

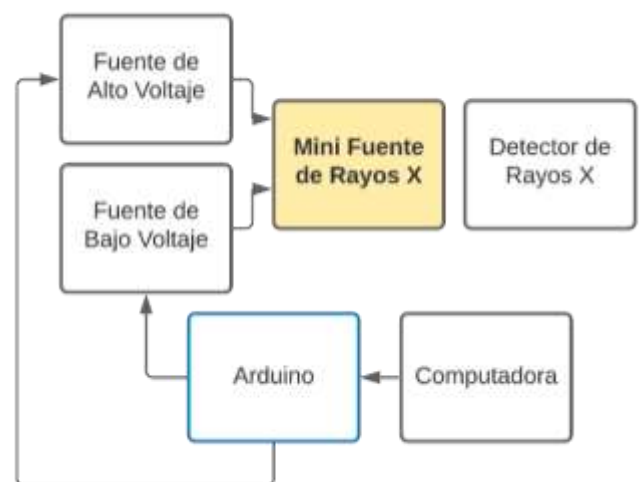


Ilustración 12 Diagrama Bloques de conexión del sistema experimental (elaboración propia en Lucid [7]).

Durante la fase de operación se comprobó el

funcionamiento del bombillo con el suministro de alto voltaje. Ilustración 13, y 14.

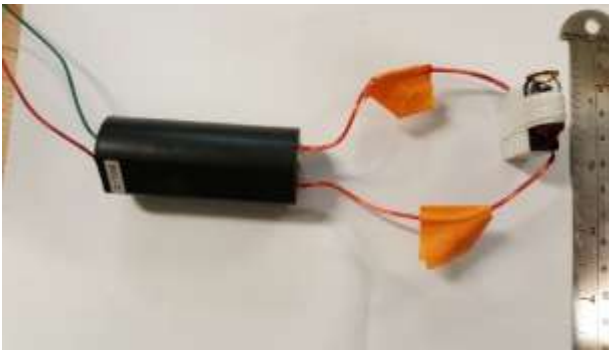


Ilustración 13 Fotografía del ensamblado inicial de la mini fuente de Rayos X.

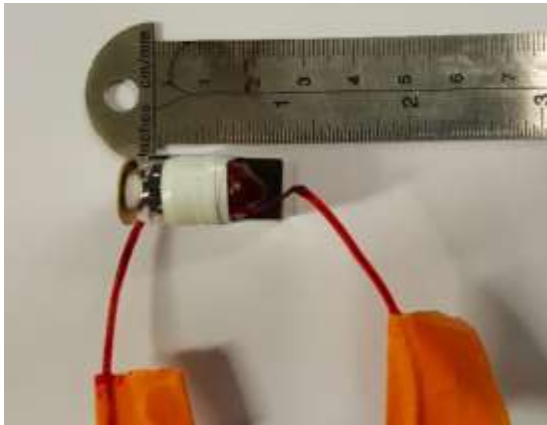


Ilustración 14 fotografía de las dimensiones del bombillo conectado a la fuente de alto voltaje.

Derivado de la operación y simulación se realizaron ajustes al diseño como se muestra en la ilustración

Y la mini fuente de rayos X, armada, quedó como se muestra en la siguiente ilustración. Ilustración 15

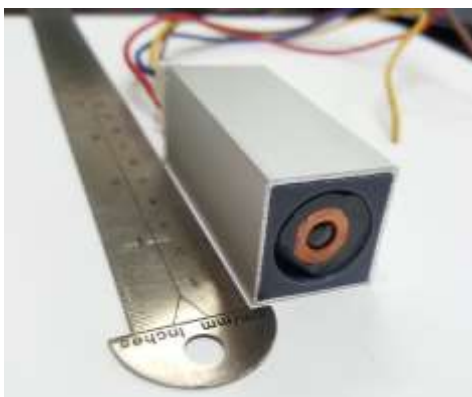


Ilustración 15 Vista del dispositivo armado. Mini fuente de rayos X.

• Simulación

Para estudiar el buen funcionamiento del dispositivo fueron simuladas las diferentes etapas de la operación, usando Geant4. Cada etapa de la construcción fue simulada para asegurar la total comprensión y predicción del funcionamiento y operación del dispositivo.

Se escribió el código para el funcionamiento del Arduino [8] de manera que pudiera alternar la alimentación del bombillo y del suministro de campo eléctrico para asegurar la correcta operación de la mini fuente.

Este, se simuló utilizando Tinkercad [9] y se construyó previamente a la operación con la mini fuente. Ilustración 16.

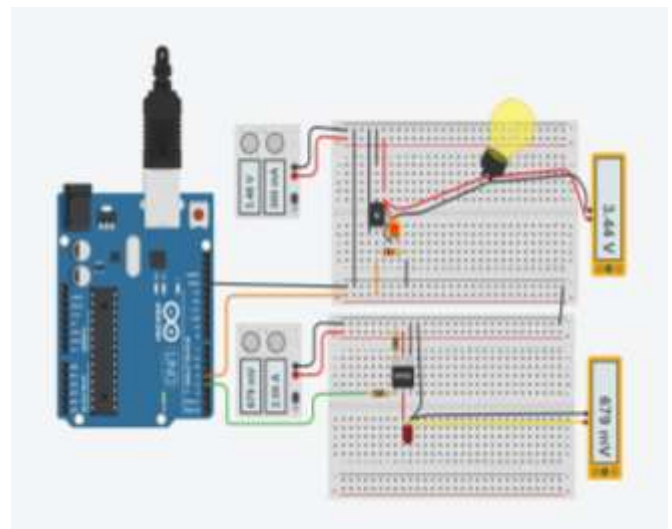


Ilustración 16 Simulación de la electrónica de control utilizando Arduino (elaboración propia en Tinkercad [10]).

Se ha simulado la generación de rayos X en la superficie de vidrio, de acuerdo al modelo de Bethe Heitler en ROOT [11][6].

Con este modelo estimamos la generación de los rayos X generados por la mini fuente de rayos X como función de la energía relativa de los fotones, es decir, como el cociente de la energía del electrón a la energía el fotón. Ilustración 17.

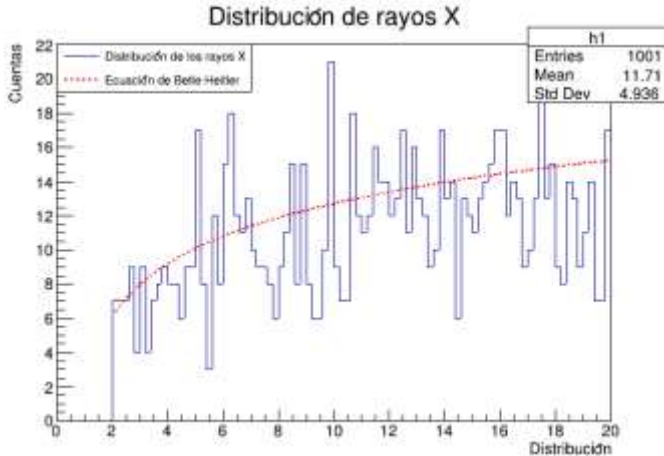


Ilustración 17 Gráfica elaborada en Root, donde se muestra la generación de rayos X según la ecuación de Bethe Heitler y la comparación con un espectro aleatorio.

De acuerdo a este modelo, se realizó la simulación de la producción de fotones en GEANT 4 [12] [13] obteniendo las siguientes imágenes, donde las trazas rojas corresponden a electrones (radiación beta) producidos con electrones que chocan contra una placa de vidrio y las trazas verdes corresponden a fotones emitidos. Esto corresponde a la simulación de la producción en el foco de la mini fuente de rayos X. Ilustraciones 18 y 19.

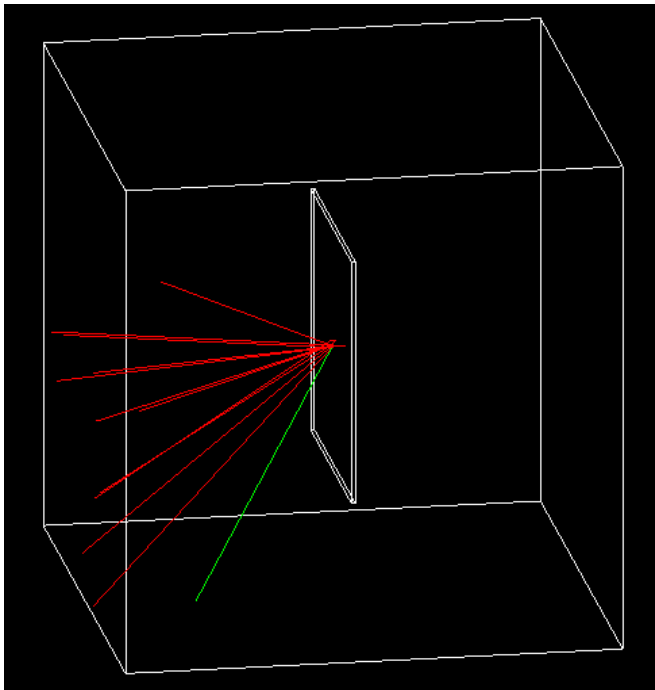


Ilustración 18 Simulación de la producción de fotones al estrellar electrones acelerados contra una placa de vidrio. (Elaboración propia utilizando GEANT4[13]).

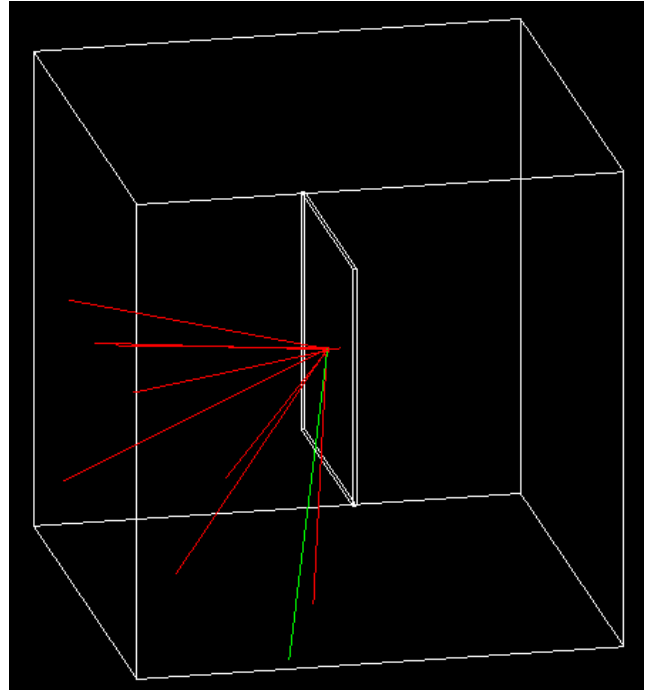


Ilustración 19 Otra vista a diferente energía de la producción de fotones a partir de electrones acelerados que chocan contra la pared de vidrio. (elaboración propia utilizando GEANT4[13]).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Por medio de un detector de radiación Vernier [14] fue posible detectar rayos X producidos por la fuente de rayos X en operación con una actividad de 1000 Bq. Ilustración 20.



Ilustración 20 . Vista de la mini fuente de rayos X conectada y en operación.

Detectamos y medimos el número de cuentas por unidad de tiempo, un segundo [15]. Ilustraciones 21

y 22.

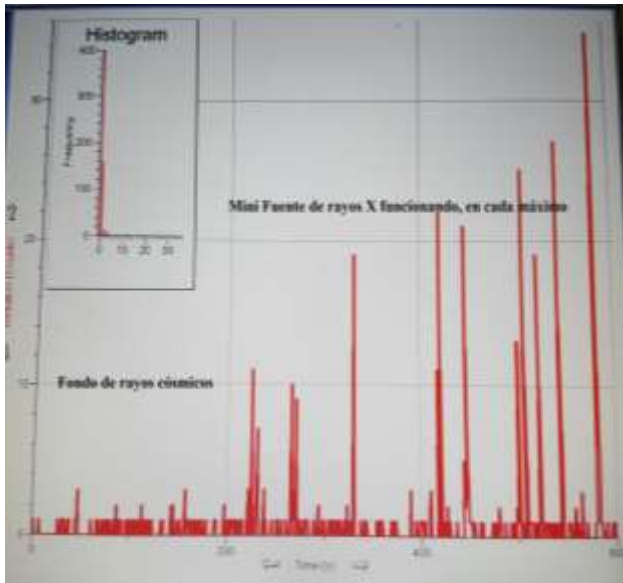


Ilustración 21 Gráfica que muestra la primera toma de muestras de la mini fuente de rayos X con el modelo de placa de cobre.

Obteniendo como resultados un mayor número de observaciones al tener en funcionamiento el dispositivo.

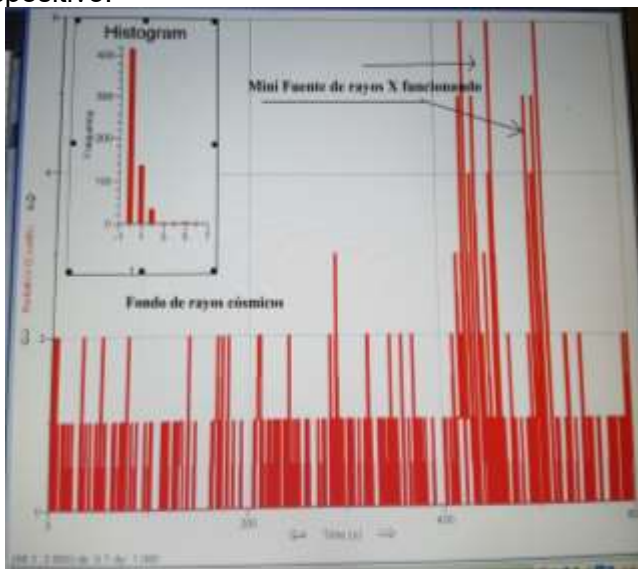


Ilustración 22 resultados preliminares de la operación de fuente de Rayos X.

Modificamos la mini fuente de rayos X como se muestra a continuación. Ilustración 23.

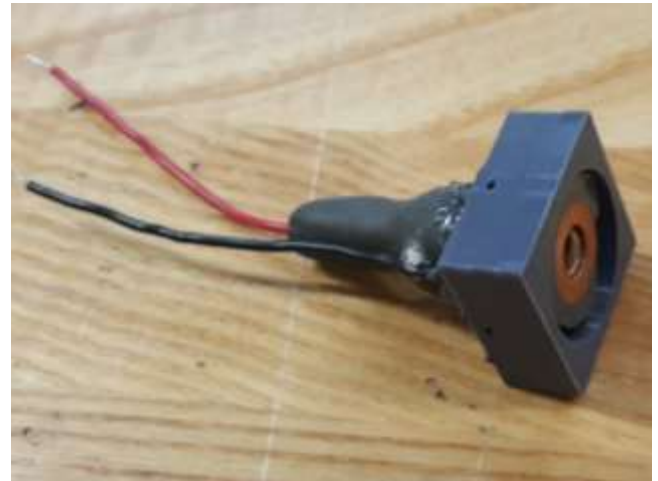


Ilustración 23 Vista de la mini fuente de rayos X modificada.

Con estas modificaciones adquirimos datos y se obtuvo esta gráfica con el equipo Vernier. Ilustración 24.

En todas estas gráficas, las señales de los rayos cósmicos sólo llegan a 3 cuentas por segundo, a lo más. Al aplicar la fuente de rayos X, las cuentas se incrementaron hasta 13 cuentas por segundo a un voltaje de operación de la fuente de 2.5 V. Corresponde a más del 400% por arriba del nivel de los rayos cósmicos.

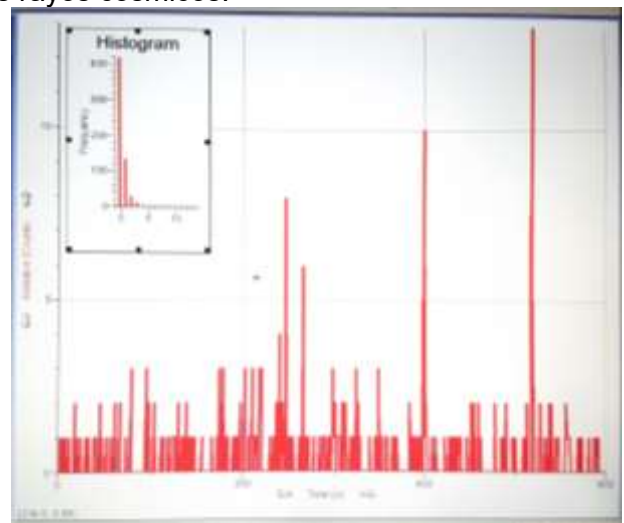


Ilustración 24. Datos obtenidos con la mini fuente de rayos X modificada y colectados con el detector Vernier [14].

La gráfica con los datos en ROOT, están en la ilustración 25. Ilustración 25.

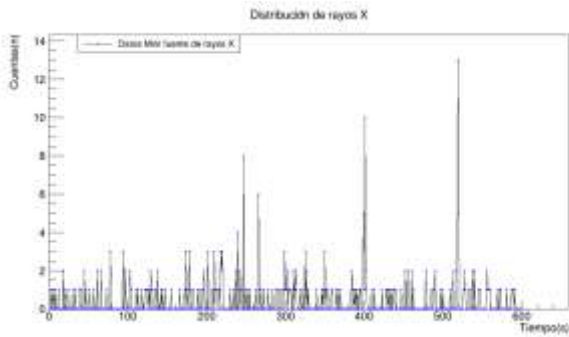


Ilustración 25. Datos originales obtenidos con la fuente de rayos X. (elaboración en ROOT).

Las cuentas por segundo, hasta tres cuentas corresponde al nivel de radiación cósmica. Por arriba de este nivel, ilustrado con los picos de la gráfica a 250 s (4, 8 y 6 cuentas por segundo), a 400 s (6 y 10 cuentas por segundo) y 520 s (13 cuentas por segundo) corresponde a la aplicación de la mini fuente de rayos X. Corresponde a 4, 8 y 6 Bq; a 6 y 10 Bq; y a 13 Bq de actividad de la mini fuente de rayos X, respectivamente.

Cada vez que se aplica la mini fuente de rayos X al detector se observan señales por arriba de las señales de rayos cósmicos. Esto demuestra que la mini fuente de rayos X funciona como se ha planeado y diseñado.

El histograma de frecuencia de cuentas como función de las cuentas por cada segundo de los datos obtenidos y la ecuación de distribución de ajustó con una distribución gaussiana en ROOT [6]. Ilustración 26.

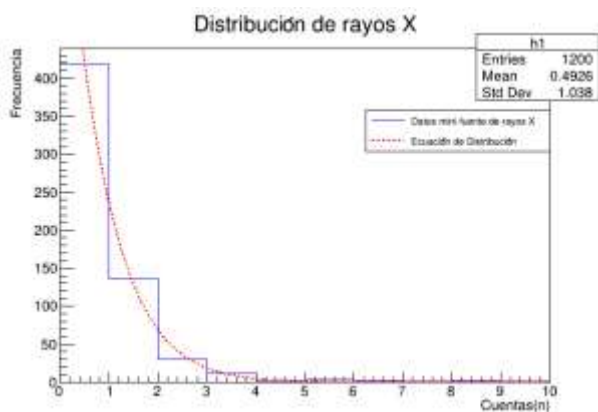


Ilustración 26 Ajuste a una exponencial de datos obtenidos con la fuente de rayos X. (elaboración en ROOT).

De acuerdo con los datos obtenidos el diseño ha mejorado las condiciones de la emisión de electrones.

Ya no se está utilizando el término ionización, sino la emisión por efecto del campo eléctrico. De acuerdo con la simulación en GEANT 4, suponemos que existe generación de rayos X y radiación beta (electrones) en el proceso.

El dispositivo armado provee un blindaje a la radiación para seguridad de los usuarios.

CONCLUSIONES

Hemos diseñado, construido, y operado una mini fuente de rayos X, donde con toda seguridad se producen también rayos beta (electrones), de acuerdo a las observaciones y simulaciones realizadas.

El nivel de radiación máxima observada corresponde a 1000 Bq. De las observaciones realizadas establecemos que posiblemente esta radiación corresponde a rayos X y radiación beta por arriba del nivel de ruido de la radiación de rayos cósmicos, de acuerdo a las mediciones realizadas con el detector de radiación Vernier.

Es posible construir una fuente de Rayos X de bajo costo, compacta con el diseño propuesto para fines del estudio de detectores de radiación y con fines didácticos.

Es posible, y deseable, programar y operar la electrónica de control, diseñada con Arduino, para controlar y programar la mini fuente de rayos X, y de betas, para operar completamente de manera remota, tanto para la seguridad de los operarios como para automatizar el control de voltaje y tiempos de operación.

Esta mini fuente de rayos X puede modificarse de varias maneras, a partir del diseño; por ejemplo, que el contenedor, el bulbo de vidrio, aloje la lámina de cobre perforada y se incorpore con la ventana de vidrio, aislar eléctricamente los componentes con parafina y hacerla todavía más compacta.

Es necesario continuar el estudio de la radiación beta emitida, la radiación X emitida y los blindajes para poder discriminar ambas, en estudios posteriores.

AGRADECIMIENTOS

Al programa de Verano de la Ciencia de la Universidad de Guanajuato por permitirnos participar de esta estancia de Investigación, a la Universidad de Guanajuato, y al Laboratorio Internacional de Partículas Elementales por brindar los materiales y el equipo para realizar el proyecto.

REFERENCIAS

- [1] J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics, 3rd Edition*. 1999.
- [2] “Blender,” *PCI-Paint and Coatings Industry*, no. November 2014. 2014, doi: 10.3109/9781420009415-62.
- [3] M. Brightman, “SketchUp,” in *The SketchUp Workflow for Architecture*, 2018.
- [4] SolidWorks, “introducing solidworks Contents,” *Dassault Systèmes SolidWorks*, 2015.
- [5] “Dr. Meter.” <https://drmeter.com/products/dc-bench-power-supply-1>.
- [6] “Root Cern.” <https://root.cern/>.
- [7] A. Faulkner, “Lucidchart for Easy Workflow Mapping,” *Ser. Rev.*, vol. 44, no. 2, 2018, doi: 10.1080/00987913.2018.1472468.
- [8] <https://www.arduino.cc/>, “Arduino - Home,” *Hardware*. 2016.
- [9] R. Abburi, M. Praveena, and R. Priyakanth, “TinkerCad - a web based application for virtual labs to help learners think, create and make,” *J. Eng. Educ. Transform.*, vol. 34, no. Special Issue, 2021, doi: 10.16920/jeet/2021/v34i0/157209.
- [10] S. C. Bryant, *Tinkercad*. 2018.
- [11] R. Kumar Acas and A. Tripathi, “ROOT: A Data Analysis and Data Mining Tool from CERN,” *Casual Actuar. Soc. E-Forum*, 2008.
- [12] K. Amako *et al.*, “GEANT4 and its validation,” *Nucl. Phys. B - Proc. Suppl.*, vol. 150, no. 1–3, 2006, doi: 10.1016/j.nuclphysbps.2004.10.083.
- [13] “GEANT4.” <https://geant4.web.cern.ch/node/1>.
- [14] “Vernier Radiation Monitor.” <https://www.vernier.com/video/digital-radiation-monitor-tech-tips/>.
- [15] W. E. Burcham, M. Jobes, and E. M. Henley, “Nuclear and Particle Physics,” *Phys. Today*, vol. 48, no. 11, 1995, doi: 10.1063/1.2808262.