



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTTLÁN**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN MONITOR DE  
RADIACIÓN NUCLEAR CON DETECTORES  
GASEOSOS**

**TESIS**

Que para obtener el título de:

**INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES, SISTEMAS Y ELECTRÓNICA**

**PRESENTA:**

**CARLOS EDUARDO CASTILLO GODÍNEZ**

**ASESOR:** M. en C. Fernando Patlán Cardoso



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



---

---

Cómo único autor deseo expresar mi más sincero agradecimiento a las siguientes personalidades que a lo largo de mi trayectoria y formación profesional y personal, han apoyado, a que el día de hoy esté aquí, culminando mi formación.

Al G. . A. . D. . U. . cuya guía y devoción me han llevado hasta el punto donde hoy me encuentro.

A la Bióloga y madre, Fátima Godínez Torres, que sin su apoyo desde que abrí los ojos por primera vez, no habría recibido educación de calidad desde temprana edad, factor que apoya a que el día de hoy pueda luchar por ser un profesionista en aspiraciones de la mejor Universidad de México y de LATAM. Gracias, madre mía por apoyarme desde siempre, en mis éxitos y fracasos. Por siempre agradecido contigo.

A mi abuelita Margarita Torres Zepeda, mi segunda madre, que me dio soporte de todo tipo al ver mis ganas de querer superarme académica y personalmente, gracias a ella pude costear parte de la carrera, a su apoyo que me brindó desde niño, cuidándome cuando mi madre iba a la universidad, muchas gracias por ser parte de mi vida.

Al I.M.E. Jonathan Fortino Hernández Silva, muy probablemente el hombre responsable que esté el día de hoy culminando una ingeniería, el maestro culpable por hacerme adquirir un gusto por las matemáticas y física desde secundaria y preparatoria. Su instrucción siempre me hizo querer mejorar, aprender y salir de una zona de confort, si el tuviese una frase, seguramente sería “Cualquiera puede ser bueno en matemáticas con el instructor adecuado” Gracias Johnny Gusteau.

A mis tíos Betty, Paty, Susi, Lourdes, Toto, Toño, Silvia, cada uno de ellos me apoyó en su momento de diferentes formas, haciéndome crecer profesionalmente con su ayuda. Gran parte de este trabajo culmina gracias a ello a lo largo de toda la ingeniería. Muchas gracias.

A mis primos Rubén, Alan, Israel, cada uno de ellos brindándome lo que conocen, sus opiniones, su compañía a lo largo de sus vidas, el día de mañana estarán en procesos similares. Gracias por estar allí.

A mis muy QQ. . HH. . Estela, Arturo, Indra, Liviert, Rodrigo, cada uno de ellos en sus profesiones acompañándome en este camino de mejoría humana. Muchas Gracias.

Al I.M.E. Elpidio Cruz Castillo, por ayudarme incontables veces con el desarrollo y pruebas del Contador Geiger, y con su instrucción particular en la construcción de PCB de diferentes variantes. Gracias por todo.

Al M. en C. Fernando Patlán por aceptar mi proposición del proyecto de tesis, por aceptar mi trabajo aún en pandemia, y por brindarme sus conocimientos de ingeniería, física nuclear y ciencias para desarrollar este trabajo. Así mismo por ayudarme con el proceso del programa PAPIIT-IT100223 y obtener soporte de ello. Eternamente agradecido.

Al Ing. José Luis Barbosa Pacheco por apoyarme en el desarrollo y corrección de esta tesis, brindándome su tiempo para revisar cada punto y cada redacción para lograr entregar un trabajo digno de un ingeniero.

---

---

A la I.M.E. Noemí Hernández Domínguez por ser mi guía en el proceso de mi Servicio Social y ser una gran amiga y consejera a lo largo de sexto semestre en adelante. Con usted aprendí a ser cabal en cuanto mi forma de ser, aprendí a trabajar bien, en tiempo y forma, a hacerme un profesional responsable, a ser “bien hecho” y si algo no resulta, aplicar precisamente la ingeniería y resolver los problemas, sin duda una gran persona con los alumnos que muestran un genuino interés. Muchas gracias por su ayuda desde 2019.

Al I.M.E. Ernesto Aguilar Rodríguez, por ser cooperador de mi servicio social, por ser un gran amigo personal, un camarada que me apoyó en muchas cuestiones a lo largo del 2022. Muchas gracias por estar en este punto de mi carrera, y enseñarme el mantenimiento de equipos de laboratorio.

Al Dr. Oscar Ibáñez por impartirme la asignatura de Instrumentación Electrónica Avanzada y conectarme con el Ing. Fernando Patlán para la determinación final del tema de esta tesis. Su instrucción fue importante para que me decidiera por ello, además su apoyo en el programa PAPIIT del 2022.

A mis camaradas de la carrera, que me apoyaron desde primer semestre en diferentes áreas, con quien pude resolver muchas materias y cuestiones académicas, gracias a muchos de ellos disfruté esta etapa que es la universidad y más aún por relacionarme con personas muy hábiles e inteligentes para lograr diferentes conexiones. Gracias a todos ellos. Ana, Liz, Mijangos, Magdiel, Itzel, Jorge, Alonso y Genaro por mencionar algunos. Muchas gracias a todos los que se han cruzado en mi camino.

Jeff Keyzer, to be the kind of fella which love for knowledge, engineering and science is strong and big enough to share it with all the world, thanks to you, I managed to design my own version of the project thanks to all the discovering you’ve done. I’m very grateful because you share it with a DIY perspective, every file, every code and design placed to all of us in a simplified format to all of us inventors and engineers.

A mí por haber llegado a este punto de mi propia vida, por aguantar semestres donde solo dormía dos horas cada 5 días, por dar absolutamente mi mejor versión para ser de los pocos que terminamos el plan de estudios en tiempo y forma, por pasar el temible examen de selección para la UNAM que tomó años para su preparación y estudio adicional intensivo para ingresar y descubrir las mieles de ser miembro de esta vasta institución, ahora soy parte funcional de mi universidad, gracias a la UNAM por permitirme probarme por todo este tiempo que desde 2017 inicié.

Al programa DGAPA-UNAM (PAPIIT-IT100223) y FESC-UNAM (CI2227) por su apoyo en el desarrollo de este proyecto.

Antecedentes	VII - IX
Objetivos, Generales, Particulares e Industriales	X
Metodología	XI
Introducción	XII - XIX
Justificación	XX

## Capítulo I

Conceptos Básicos de medida y detección de la radiación Nuclear	2
1.1 ¿Qué es un monitor de Radiación Nuclear?	2
1.1.1 Utilidad de un monitor de Radiación Nuclear.	3
1.1.2 Tipos de variables radiactivas que pueden ser medidas.	4
1.1.3 Planteamiento de diseño de los monitores propuestos.	5 - 6
1.2 Métodos para la cuantificación de datos.	6 - 7
1.3 Desintegración Radiactiva.	7 - 8
1.3.1 Desintegración Alfa $\alpha$ .	9
1.3.2 Desintegración Beta $\beta$ .	10
1.3.3 Desintegración Gamma $\gamma$ .	11 - 12
1.4 Los Rayos X (Origen Atómico).	12 - 13
1.5 Detección de la Radiación Nuclear.	13 - 14
1.6 Detectores Gaseosos.	14 - 16
1.6.1 Tubo Geiger-Müller.	16 - 18
1.6.2 Etapa de descarga Geiger.	18 - 21
1.6.3 Gases utilizados.	21 - 22
1.6.4 Meseta Geiger-Müller.	22 - 23
1.6.5 Comportamiento temporal, extinciones y repliegues.	24 - 26
1.6.6 Fases de detección.	27
1.6.7 Condiciones de diseño.	28
1.6.8 Eficiencia de detección.	29
1.6.9 Tubo Geiger-Müller SBM-20 Soviético.	30 - 32
1.7 Cámara de Ionización.	32 - 33
1.8 Detector proporcional.	33 - 35
1.9 Contador Geiger, sistema y monitor.	35

---

---

## Capítulo II

### Desarrollo Experimental

2.1 Plan general de diseño circuital [SBM-20] (Electrónica Asociada).	36
2.1.1 El Diseño original de Jeff Keyzer [Hardware Libre].	37 - 38
2.1.2 Modificaciones del diseño de Mighty Ohm de Jeff Keyzer.	38 - 39
2.1.3 Acoplamiento con ESP32 y generación de código.	39 - 40
2.1.4 OLED AdafruitSSD1306 y dispositivos de control.	41
2.1.5 El Microprocesador ATTINY2313-A.	42 - 43
2.1.6 Sensor de temperatura y humedad DHT22.	43 - 44
2.1.7 Diseño del PCB con Autodesk EAGLE.	44 - 45
2.1.8 Armadura y portabilidad.	45 - 46
2.2 Modelos estadísticos previstos.	46
2.2.1 Aplicación de los modelos estadísticos.	47
2.2.2 Propagación del error.	47
2.2.3 Límites de Detectabilidad.	48
2.2.4 Distribución de los intervalos de tiempo.	48 - 49
2.3 Detección de la radiación nuclear.	49
2.4 Sensor digital primario, Captador de variable.	49 - 50
2.5 Acondicionamiento de entrada.	50 - 52
2.6 Adquisición de señales analógicas radiactivas.	52
2.7 Conversión Analógico a Digital.	52 - 54
2.7.1 Conversión A/D por Gaussiana.	54 - 55
2.8 Aproximación de detección del tipo de isótopo / material.	56
2.9 Detección de No. de Partículas por $u(t)$ de fotones.	56 - 57
2.10 Método temporal hasta el primer conteo.	57 - 59

## Capítulo III

### Software de simulación y funcionamiento.

3.1 Construcción virtual y funcionamiento circuital.	60 - 64
3.2 Búsqueda de circuitos equivalentes para simulación por criterio de familias y corrientes.	64 - 66
3.3 El generador de pulsos y simulación virtual de radiación.	66 - 67
3.4 Diseño de PCB.	68 - 69

## Capítulo IV

### Resultados y Conclusiones

4.1 Pruebas de campo y recolección de datos.	70
4.2 Presentación de resultados y análisis de información.	70 - 71
4.3 Comparación de resultados con regulaciones atómicas y nucleares.	71 - 72
4.4 Descripción de hallazgos.	72 - 73
<b>Conclusiones.</b>	73 - 74

<b>Glosario</b>	75
-----------------	----

<b>Bibliografía</b>	75
---------------------	----

<b>Apéndice A:</b> Hojas de datos técnicos.	76
---	----

<b>Material de trabajo:</b> Lista de material (Circuitería y material radiactivo) ☼	77 - 78
---	---------

---

---

## Antecedentes

La Tesis presentada, trata sobre la implementación de un detector de radiación nuclear a partir de un tubo Geiger-Müller y el desarrollo de la electrónica asociada para lograr la cuantificación y detección de la señal analógica obtenida. Asimismo, el desarrollo de diferentes sistemas capaces de contar los pulsos de radiación obtenidos de una fuente y conseguir por medio de una fuente de alto voltaje, implementada con elementos activos y pasivos, para la correcta alimentación del tubo Geiger y conseguir la miniaturización del sistema, haciéndolo portátil.

Desde que el desarrollo de la electrónica se volvió paulatinamente más accesible en términos de conocimiento y obtención de materiales, se tiene una enorme ventaja en esta época al poder construir modelos electrónicos capaces de adquirir diferente comportamiento según sean las necesidades.

Se abarcan diferentes disciplinas a lo largo de este escrito, por un lado, las matemáticas, son fundamentales porque se van a aplicar diferentes cálculos estadísticos, todo ello porque nuestra variable a analizar es muy pequeña físicamente hablando pero muy abundante en ciertos entornos, en este caso, la radiación tiene diferentes comportamientos, y considero importante explicar cada uno de ellos a lo largo de este trabajo, pero en esencia son cantidades de energía liberada de manera espontánea en algunos casos y otros solamente manifestados como un ligero destello ubicado en un área. Si bien se aprecia entonces, la radiación es una manifestación del mundo atómico donde a simple vista no se tiene conocimiento que un evento meramente energético está sucediendo. Por otra parte, una disciplina más y quizás la más importante de este trabajo, es la física, si hablamos de movimiento de partículas y de energía es incuestionable que estamos hablando de eventos que obedecen ciertas leyes naturales, que científicamente ayudarán a entender el propósito de este escrito.

La física nos dice, que la radiación grosso modo, es lo que se origina, el producto de procesos atómicos o nucleares. Es la emisión, propagación y transferencia de energía en algún medio en forma de ondas o partículas según sea, y tienen diferentes categorías, pero al ser procesos donde son involucrados diferentes factores que suceden bajo ciertas condiciones, que pueden ir desde algunas conocidas por el hombre o bien desde otras, de magnitudes inimaginables como las ocurridas en el universo, es por ello por lo que es de vital importancia que entonces se conozca, esta manifestación “invisible” ¿Por qué? Ese es otro interés abordado.

Por último, pero sin dejar su debida relevancia, se tiene la disciplina de la ingeniería, que comprende a la eléctrica y la electrónica, además de la computacional. El Diseño del monitor, necesita ser lo suficientemente confiable, robusto hablando de su resistencia a esta manifestación energética y con una apertura evolutiva, es decir, que a medida que se conozcan entornos donde se necesite dicho monitor, este, tenga la capacidad de lograr mejorarse añadiendo, sustrayendo o sustituyendo componentes. La ingeniería electrónica cobija esta idea perfectamente porque hay un componente para poder captar casi cualquier variable analógica, ese es el punto culminante de esta investigación, ¿Cómo se podría construir algo capaz de medir manifestaciones energéticas invisibles para el humano? Posteriormente se abarca un poco de historia, pero se conoce hoy en día que a diferentes dosis de radiación de cierto tipo resultan desde lacerantes, fatales a mediano y largo plazo o mortales en cuestión de algunos días. Tener un dispositivo capaz de medir este comportamiento físico resulta ser conveniente para la población general o personal laboral inmerso en áreas donde abunde esta energía en pequeñas o grandes cantidades, ¿para qué? Salvaguardar la vida.

---

---

Si se ha de diseñar un dispositivo que cumpla con todo lo anterior y que vaya de la mano con lo mencionado en las disciplinas, entonces se debe saber por qué hacerlo.

Partimos desde la premisa de Marie Curie, que habría ocurrido con ella de haber conocido la dosis que recibía en su laboratorio, ¿Era capaz de recibir esa dosis por uno o dos días, meses? O ¿Bastó con la intervención de un isótopo una sola vez para enfermarle permanentemente?

Entonces, si imaginamos diferentes escenarios, donde se encontrase alguna persona u organización en una excavación, un isótopo de manera natural como el Uranio-235 ( $U^{235}$ ), y claro, hoy pensaríamos que es un elemento fácilmente reconocible, pero no, fue sino hasta 1935 que el físico Arthur Jeffrey Dempster lo descubrió, es decir menos de 100 años que se tiene conocimiento oficial de este elemento y sus potenciales efectos. Es bastante curioso porque además que se puede encontrar naturalmente bajo condiciones específicas, tiene un *Periodo de Semidesintegración* de casi 700 millones de años. Por lo tanto, manipular un elemento de esta magnitud sin la debida protección, puede y podrá desencadenar efectos severos en el portador descuidado.

Entonces, un minero, un ingeniero de excavación, un obrero de suelos, de tener un desafortunado encuentro con un radioisótopo semejante provocaría desde contaminación de área hasta infertilidad de suelos. Claro, el ( $U^{235}$ ) no es tan abundante, solo el 0.72% de todo el uranio natural es ( $U^{235}$ ), el resto es estrictamente Uranio-238, pero el detalle aquí que es una concentración más que insuficiente para desencadenar una reacción nuclear de importancia, pero igualmente no debe manipularse a la ligera, además claro al ser escaso naturalmente, tiene cierto valor monetario, por lo tanto, de tener un dispositivo portátil capaz de detectar los picos que particularmente emite el ( $U^{235}$ ), sería como encontrar oro.

La utilidad no termina allí, muchos gobiernos a lo largo de las últimas décadas, en particular los que tienen acceso a la tecnología de detección y extracción de diversos materiales radiactivos, se ven en la penosa necesidad de deshacerse ellos, muchos pensaríamos que lo han hecho de la forma responsable, pero no, algunos empresarios son conscientes que no lo han hecho, depositándolos en espacios donde se desarrolla la vida civil o vida silvestre, entonces, al ser un secreto bien guardado; ¿Cómo sabríamos que partes de la Tierra están contaminadas?

Suena particularmente increíble poder transitar por un bosque o zona natural a explorar sin tener conocimiento si se designó clandestinamente como zona contenedora de desperdicio radiactivo, se sabría solamente hasta años después que se ha desarrollado algún tipo de cáncer o enfermedad celular degenerativa por un diagnóstico médico que señale una exposición radiactiva.

Pero; ¿Es acaso un tanto risible pensar que todas las personas deberían tener un monitor de este tipo consigo? bueno, eso se le transfiere a los ingenieros o físicos profesionales, designados a explorar algunas zonas sospechosas de tiempo atrás donde exista contaminación. Pero se tiene conocimiento, que hay utensilios de cocina que tienen contaminación, como la famosa colección “*Fiestaware*” vendida en EE. UU. entre 1930 y 1960.

En resumen, podemos entender que construir un monitor de radiación nuclear es para usos específicos que involucran entonces factores totalmente de seguridad, prevención y claro contención. Al saber todo ello, puedo continuar con desglosar lo que me interesa sobre este tópico.

---

---

¿Poque con detectores gaseosos? Claro que se tendrá un desarrollo explicando con lujo de detalle esta parte particular, pero para dar inicio a esta parte de la investigación, retomare un poco la disciplina de la física, entonces, los gases, conocemos este estado de la materia, podemos imaginarlos con un sinfín de características, si tiene color, olor o alguna clase de permanencia en una zona, como el vapor de agua, o el gas lacrimógeno, muchos tienen particularidades que los hacen útiles según sea su aplicación industrial o científica.

Aquí nos interesa uno en particular, el gas contenido en los tubos Geiger-Müller, igualmente es algo que explicaré a detalle más adelante, pero es en esencia una cavidad tubular claro, que alberga un gas capaz de ionizarse, esto quiere decir que va a cambiar sus propiedades cuando se le acerque lo suficiente una fuente radiactiva tal que logre que el gas pierda o gane electrones y que entonces pueda saber cuándo ocurre, en tiempo real por supuesto una detección.

Todo se resume a que este proceso físico de ganancia o pérdida de electrones causado por un contacto espacial de radiación puede ser cuantificado de alguna forma, pero entonces si pasamos de no saber dónde está la radiación, a como saber cuándo mi estructura tubular Geiger pierda o gane electrones; ¿No se estaría llegando a una encrucijada? Bueno, naturalmente si, de no tener toda la gama de ciencias, disciplinas y materiales de hoy en día no sería posible.

Es el punto donde todo ahora tiene sentido, si hay una manifestación de energía que no es observable a simple vista, pero se sabe o se sospecha que se encuentra en una zona, se tiene que acudir a otra forma “análoga” de poder saber si es verdad que se encuentra y en qué cantidad. El monitor de radiación con un detector gaseoso cumpliría con esa función, mientras este encendido, va a lograr captar esos pequeños pulsos que se crean cuando se ioniza el gas. Paso de no saber que energía se encuentra a saber qué tipo de fenómeno de radiactividad me enfrente y claro la dosis.

Por último, si se está trabajando con un fenómeno de respuesta en pulsos, debemos saber realmente cuantos pulsos ocurren, porque la radiactividad no tendría la misma frecuencia de ionización con todos los isótopos ni con todas las áreas de contaminación, es decir, algunas serían mayores, menores y otras que se comporten de formas extremas o muy altas para poder actuar de forma rápida a otras muy bajas pero existentes que significarían un peligro a cierto plazo de no poderlas detectar los pulsos suficientes para considerarlos radiactivos de interés.

Todo ello se va a exponer veraz y fácilmente, si es una manifestación de energía radiactiva que ya haya sido medida, tendrá entonces un dispositivo de salida que reporte esas lecturas para que sea legible al operador y sobre todo confiable para uso industrial o personal.

---

---

## Objetivos

### Generales

Diseñar un sistema de monitoreo de radiación nuclear asequible utilizando un detector gaseoso e implementar con base en los conocimientos de la carrera de ingeniería en telecomunicaciones, sistemas y electrónica, un sistema electrónico eficaz, certero y confiable de las variables radiactivas ionizantes que se presentan en la naturaleza y construidas por el humano a niveles delimitados para asegurar zonas de trabajo y de residencia humana seguras con base a las diferentes normativas nacionales e internacionales en materia atómica y nuclear. Además, construir el monitor con parámetros de portabilidad reales para uso en campo, con tecnología moderna aunada a algunas disciplinas aprendidas a lo largo de mi formación académica global.

### Particulares

Utilizar las herramientas y conocimientos adquiridos en el módulo de especialización de noveno semestre de sistemas analógicos para construir un sistema expandible, mejorable y adaptable para que, a partir de la electrónica asociada, se pueda lograr la captación de la radiación en todas sus manifestaciones a una exposición segura del operador. Además, poder generar modelos circuitales que sean fácilmente operables en cualquier parte del mundo y que personal con capacidades y conocimientos de ingeniería eléctrica, electrónica y de sistemas lo pudiese construir en caso de necesitarlo.

Demostrar cómo un conocimiento sólido de ingeniería es capaz de resolver problemas al momento de diseñar un dispositivo capaz de ser fiable y conciso a las variables para las cuales ha sido destinado.

### En la Industria

Anteponer la seguridad de la vida biológica con ingeniería electrónica capaz de adquirir, muestrear y procesar los datos de interés con completa fiabilidad y legibilidad de las lecturas. Implementar el sistema de detección y construirlo a modo de ser una herramienta de uso ya sea puramente industrial o personal de zonas de riesgo para obtener certeza en materia de medición para espacios peligrosos en estaciones de energía nuclear, de tratamiento de residuos o de actividades científicas de alto nivel.

### En Emergencias

Presentar el diseño final, aunado con un código de operabilidad que sea capaz de poder ser consultado en cualquier parte del planeta mediante el guardado en repositorios de códigos, brindando instrucciones sobre la operabilidad ante situaciones de riesgo nuclear.

---

---

## Metodología

Ordenar cada concepto físico, químico e ingenieril para consolidar el modelo de monitor a implementar para que, con base en las diferentes especificaciones, se logre crear un sistema coherente de instrumentación electrónica que logre captar únicamente las variables ambientales que se necesitan.

Se investigará qué tipo de gas o gases son los que utilizan los tubos Geiger-Müller previstos para este fin y cuales pueden detectar más de un tipo de desintegración para que partiendo de allí se establezcan condiciones de diseño y por consiguiente seleccionar el tipo de detector adecuado para los fines que se estan persiguiendo.

Después, partiendo de la premisa de ser un dispositivo portátil, se analizará qué tipo de fuente de voltaje, es capaz de alimentar cada componente como es debido y sin necesidad de ocupar un espacio que torne incómodo su operación. Existen diferentes estrategias que se podrían seguir para miniaturizar satisfactoriamente el diseño, pero cabe señalar que los componentes de la electrónica necesitarían niveles de voltaje distintos entre sí.

Posteriormente, se elegirá la electrónica asociada adecuada para la implementación del sistema de monitoreo. Esto se debe realizar con base a los recursos electrónicos que mejor puedan resolver la necesidad de conteo y el tipo de detector que se esté utilizando. En este caso podemos hacer uso de fuentes de alto voltaje estacionarias para pruebas, amplificadores, preamplificadores, microcontroladores, microprocesadores, convertidores analógico-digital, digital-analógico y sistemas de conteo.

Finalmente, la parte medular es determinar cómo se va a distribuir el arreglo circuital para que cada componente no tenga conflictos con sistemas a su periferia, ello incluye: interferencia electromagnética, sobrecargas, sobrecalentamiento, disipación de calor, cortocircuitos, circuitos abiertos y obstrucciones para el sensor.

Una vez determinado todo lo anterior, se realizarían muestreos en materiales radiactivos conocidos y otros no conocidos, es decir elementos que se conoce de antemano su radiactividad y otros que no:

- \* Cinta de luminaria contaminada, utilizada en linternas de campamento.
- \* Radionúclidos del ambiente.
- \* Fuente radiactiva patrón de Americio-241.
- \* Fuente radiactiva patrón de Cesio

---

---

## Introducción

Desde que el ser humano avanzó lo suficiente en el análisis científico para la adquisición de nuevos métodos de generación de energía, los estudios realizados en asignaturas puramente físicas datan de 1896, donde Henri Becquerel tuvo la oportunidad de observar una especie de niebla que emanaba de los minerales de Uranio, dicha niebla era escasamente visible gracias a unas placas fotográficas. Con ello en mente y con la curiosidad humana en acción, hoy en día se confirma que desde entonces se descubrió la radiactividad, donde de hecho, tiempo después se averiguó que algunos núcleos de ciertos elementos eran inestables y algunos otros espontáneamente presentaban un decaimiento.

Por esta razón investigaciones posteriores en el área física y química, llevaron a diferentes personalidades a indagar, que era precisamente la radiación, que implicaba según diferentes modelos atómicos y claro, si los diferentes elementos que se fueron observando eran candidatos para explotar con fines energéticos.

Todo ello posible hasta que los físicos Marie y Pierre Curie, en colaboración con Ernst Rutherford, establecieron que tres diferentes tipos de radiación se involucraban en algunos elementos, esos tres tipos de radiación eran notorios al momento de realizar diferentes exámenes de longitudes de onda de los minerales que se tenían. Un mineral de algún elemento suficientemente purificado que emita partículas alfa ( $\alpha$ ), serán aquellas que empíricamente son núcleos completamente ionizados, sin envoltura de electrones, y que, de acuerdo con las exploraciones realizadas, se forman por un número par de protones y otro número par de neutrones con una unidad de masa atómica unificada o (Dalton), el cual es la duodécima parte de la masa de un átomo completamente neutro y enlazado.

Las partículas beta ( $\beta$ ) por su parte son un electrón o bien un antielectrón de energía y velocidad sumamente altas, provocadas por una degradación radiactiva núcleo-atómica de decaimiento beta y emisión beta, produciendo electrones y antielectrones.

Por último, los rayos Gamma ( $\gamma$ ) entran en esta categoría por constituir la radiación ionizante fundamental, donde los procesos subatómicos de cancelaciones electrón-antielectrón, dan lugar a fotones, también fenómenos astrofísicos de alta volatilidad.

Por lo tanto, este tipo de catalogación es más fácil entenderla cuando se analizan las formas de onda portadoras de energía sobre planos de penetración físicos, es decir, la radiación es una manifestación de la energía donde dependiendo su clasificación va a ser más fácil para dicha onda traspasar cierto grosor de cierto tipo de materiales.

Con ello en mente, se puede discernir que la radiación va a tener ciertos niveles de peligrosidad para entes biológicos, ya que la frecuencia de las ondas que se manifiesten no va a tener la misma energía respecto a la distancia del punto de partida, es decir, va a ir perdiendo intensidad conforme a dos variables esenciales, tiempo y distancia.

Entonces, esto juega una problemática fundamental en la ciencia, ya sea para almacenamiento de los elementos o para su uso en la industria energética o yendo a los extremos la armamentística, la radiación es un factor contundente para considerar, porque con dosis prolongadas o cerca de un foco generatriz, las consecuencias en los cuerpos celulares pueden ser mortales.

---

---

Es por ello por lo que se necesita una forma de saber con plena certeza la cantidad radiactiva que se tiene en un ambiente, para detectar fugas o zonas de mayor concentración, todo ello gracias a la física, química y por supuesto la ingeniería de sistemas y electrónica.

Tiempo suficiente transcurrió y se llegó a la premisa de que la radiactividad era un efecto inevitable al momento de acercarse o manipular los minerales y gases que no fuesen del todo estables, los elementos naturalmente esparcidos en el planeta Tierra por supuesto no serían la excepción, y con investigación abundante, se determina que los efectos no siempre tienen las mismas consecuencias en entes biológicos-celulares. Si una persona, un físico con suficientes elementos en su arsenal de conocimiento se expone a radiactividad sin protección simplemente por creer conocer los efectos, será acreedor a un daño completamente variable, es decir si un radiólogo por alguna cuestión un solo día de su carrera olvida su indumentaria de plomo y aun así trabaja; ¿Sería suficiente para comprometer su vida a partir de ese momento? O solamente tendría una cuestión secular de bajo riesgo, como algunos técnicos nucleares soviéticos que sufrían de infertilidad después de años de laborar en plantas de energía nuclear sin protección especial.

Actualmente se tiene una gama enorme de antecedentes históricos que se han obtenido por desgracias provocadas por la curiosidad o arrogancia humana, la radiación, no es como la electricidad, no basta con respetarla, se debe entender a fondo lo que se está haciendo y siempre teniendo en cuenta los peores escenarios, aún si se llevan protocolos robustos, por esa razón la humanidad no se ha aventurado a explotar todo el poder Nuclear o Atómico, simplemente por no tener aún las suficientes maneras de contener una catástrofe en cada situación.

Este trabajo trata de la monitorización con un dispositivo electrónico, pero parte de la idea de prevenir, de medir esta variable y saber que hacer en su momento. De construir un dispositivo que resulte poco resistente a la ionización, no se tendría un eje de apoyo suficiente como para lograr considerar armar un aparato así, y ese es otro punto determinante.

Quiere decir que un amperímetro o multímetro de amplio rango, al medir corrientes altas, provocaría que al dispositivo se le funda el fusible de protección, con mayor corriente se dañe, se descalibre o en el peor de los casos que termine destruido completamente, dañando quizá al operador a no ser que esté debidamente protegido con guantes y ropa no conductora en general.

¿Pero qué pasa con la radiación? No existe como tal una medida máxima donde el tubo Geiger-Müller se sature de forma tal que explote, incluso si la ionización aborda cuestiones de pérdida y ganancia de electrones, este es el mayor peligro de la radiación, puede llegar a ser tan abundante en una zona amplia o pequeña que no se daría cuenta el operador de lo que existe a su alrededor, y en este caso recibir un daño base por estar en la zona, pero empeoraría si en un área se concentra mayoritariamente el decaimiento de algún elemento.

Si comparáramos entonces entre la energía eléctrica como un riesgo si no se toman las medidas adecuadas a su manipulación y la radiación; ¿A cuál se debe tener mayor atención? Esta es la razón por la cual, abordando las disciplinas de la física e ingeniería, se plantea crear este mecanismo de defensa, algo que nos haga saber en qué zonas del planeta Tierra está segura la vida biológico-celular, donde no lo está y donde jamás podría suceder el desarrollo de la vida celular compleja.

---

---

Entonces, entran también algunas cuestiones adicionales a analizar, la ingeniería aplicada aquí, se puede llevar más allá, a disciplinas de las ciencias biológicas para detectar zonas de probabilidad de vida celular tanto en nuestro planeta como en el espacio exterior y el universo conocido por el ser humano.

Pero para quedar muy claros en esta situación, si se considera el desastre de la planta de energía nuclear *Vladimír Ilich Lenin* ubicada en la antigua URSS, en la ciudad de Prípiat (Actual Ucrania) podemos abordar muchas cuestiones que para dar entrada a la investigación daré, cómo por ejemplo: tiempo después del accidente se trasladaron a ciudadanos soviéticos y décadas después aún existe alguna cantidad considerable de flora y fauna salvaje en las inmediaciones de la instalación y de la ciudad, claro no está abierta al público de manera masiva, pero si se puede ingresar asumiendo ciertos riesgos como visita turística, y eso no a todos los rincones de aquella famosa zona.

Lo que en este particular caso interesa para esta tesis más adelante, es analizar:

Pasadas décadas del accidente; ¿El daño en este y algún otro entorno es medible desde un punto de vista analógico? ¿La cantidad de energía liberada, y la radiación sigue siendo abundante en alguna zona comprometida, o solo en sitios de particular susceptibilidad? Y lo más importante; ¿Cómo se puede adoptar un mecanismo capaz de contar y censar la radiactividad de diferentes fuentes de origen y tener la mayor precisión en los datos? Claro no es el tópico conocer toda la historia de Chernóbil, pero lo que sí interesa es saber hasta dónde puede llegar un desastre si no se tiene una protección y lineamientos coherentes, lo más seguros posibles en términos de respuesta y reacción.

Si se considera entonces al monitor de radiación nuclear como un instrumento de respuesta y prevención, entonces sí, seguro todos los habitantes de una potencial zona de riesgo deberían poder tener a su alcance un equipo semejante, sin importar su giro en la sociedad, es decir, desde civiles, granjeros, aviadores y médicos, esto se debe a que la radiación particular que puedan recibir depende de la distancia del epicentro de algún evento, además que se pueden contaminar afluentes de agua para poblaciones civiles como ganaderas, por lo que es un hecho que arropa a absolutamente todos.

El propósito es el estudio de la radiación, si, como un fenómeno sumamente complejo pero afortunadamente medible, pero además de la ingeniería que está inmersa para lograrlo y demostrar que no se es lo suficientemente paranoico cuando se trata de este tema al momento de buscar prevención y seguridad, claro, mucho del estudio profundo compete a físicos que tienen un conocimiento mucho mayor, pero sin la ingeniería, no se podría “ver” esta porción del universo que es la radiactividad, demostrando también que no es necesario temer si se reside cerca de una zona con una estación o planta de energía nuclear como la nucleoelectrica de Laguna Verde o más fácil, si se labora en las industrias de alimento que descontaminan con radiación, la de las bebidas carbonatadas a escala masiva o de hormigón incluso.

---

---

## Justificación

¿Que se espera a lo largo de toda esta investigación? Principalmente se conocerá la radiación de una manera sintetizada, siendo ingenieros, la formación va más de la mano por el camino de resolución de problemas y de creación/invención. Entonces, para lograr esto necesitaremos la parte de la teoría física, pero no a un modo tan profundo donde se tenga el riesgo de solo teorizar y no hacer, sino absolutamente todo lo contrario.

Pero, además, para lograr construir un dispositivo que siempre se tuvo como estigma un aparato grande, tosco y pesado para monitorear la radiación, se debe acudir a la tecnología moderna, claro, planteo construirlo con componentes “tradicionales” y encapsulados como es el caso de los transistores con encapsulado SOIC que tienen décadas en el mercado, pero si no está roto; ¿Por qué arreglarlo? Se tiene certeza que funcionará, además cuento con diferentes Software de simulación que denotan una satisfactoria respuesta, a pesar de que en algunos casos se debe construir el dispositivo en el simulador ya que no se encuentra en las librerías predeterminadas.

Hoy en día pueden existir diferentes modelos de monitores que parten de los primordiales surgidos en la era de la Guerra Fría, donde la amenaza de conflicto bélico nuclear global era algo de preocupación, además claro, que se necesitaba un aparato que monitoreara las centrales de la surgente energía nuclear por los efectos que he mencionado a la salud humana.

Como en todo, existen diferentes calidades en dispositivos, en ingeniería de instrumentación electrónica, se necesitan pocas cosas que cumplir, en primera que el dispositivo diseñado tenga un objetivo para ser creado. Lo he mencionado en muchas ocasiones, el poder monitorear la radiación nuclear, otra cuestión es la fiabilidad de las lecturas; ¿Es acaso un Vernier una mejor referencia para medir una hoja de papel que una regla de papelería? Podrá debatirse, pero al ser un proyecto sólido tengo certeza que será debidamente construido para no tener un rango de lecturas tan alejado de una contraparte super especializada existente en el mercado de sensores.

Quiero decir, que demostraría que, para entornos de referencia profesional y personal, el monitor que se implementará tendrá aproximaciones que no le pedirían mucho a un aparato de gran costo.

Continuando, la instrumentación electrónica avanzada dicta que se necesita un marco de referencia en las mediciones, un valor patrón inicial, y que, con base en él, que ha sido avalado por normas y demás, los dispositivos creados después deben de aproximarse lo máximo posible a dicho valor.

Igualmente, tiende a llevarse a cabo diferentes procesos de des calibración, es decir donde se va perdiendo la exactitud y por ende fiabilidad de resultados obtenidos. Las calibraciones suelen ser muy costosas dependiendo el dispositivo al que se refiera, pero con un monitor que tiene los elementos discretos, pasivos y de conteo, esa parte puede solucionarse rápidamente.

En este momento, quizá quede una idea muy breve de lo que se realizará, ese es otro objetivo, demostrar como para resolver un problema que en este caso es implementar un monitor de radiación nuclear asequible y fiable ante cualquier situación.

Para fines prácticos un monitor así sería de prevención en entornos industriales, pero si en algún punto de la historia humana se requiere dicha prevención ante situaciones bélicas que impliquen el poder destructivo del átomo, bueno, sería casi como tener un oxímetro un radio o un botiquín.



## **Conceptos Fundamentales en la Investigación.**

En este capítulo se presentan los conceptos básicos con los cuales se abordará el estudio de este trabajo. Para esto, se desarrollarán los conceptos básicos en los cuales está basada la medida y detección de la radiación nuclear, la cual depende de la forma en como la radiación interacciona con la materia.

### **1.1 ¿Qué es un monitor de Radiación Nuclear?**

Cuando se habla de un monitor, enseguida se concibe la idea de un dispositivo que estará en perpetuo funcionamiento reportando alguna cuestión. La idea de un monitor se genera cuando se piensa en un sistema capaz de sustituir alguna presencia humana en alguna zona, así se puede colocar en un área donde abunde cierta variable de interés para así facilitar el trabajo o bien salvaguardar la integridad de las personas.

Un monitor debe cumplir con la tarea de ser confiable y certero para lo que fue creado, por ejemplo, una persona haciendo guardia en una entrada a una escuela, tiene la tarea de verificar que quienes ingresen pertenecen a la institución, que no carguen objetos dañinos ni lascivos y que en caso de que una persona quiera ingresar a informes o alguna cuestión, se le permita el acceso con ciertas consideraciones.

Como se aprecia, el concepto engloba diferentes situaciones que el guardia (monitor) debe cumplir, todo siguiendo una directriz (programación) que puede o no tener una rigurosidad muy alta, moderada o baja, es decir, si un alumno olvida su pase de ingreso, pero ya se conoce con el guardia, existiría entonces una consideración mutua de dejarle pasar en algunos casos. Por lo que el monitor debe tener la capacidad de analizar ciertas situaciones y tomar decisiones (programación de Alto Nivel) y además poder reconocer cuando en ciertas ocasiones los alumnos acuden disfrazados o con vestimenta de civil y aun así saber quiénes sí y no pertenecen (Adaptabilidad, Actualización y Mejora).

Con esto explicado de esta forma análoga, se puede entender que un monitor va a poder sustituir a una persona, un operario en una tarea específica, poder lograr que un aparato que no necesita descansos ni horario de comida para que cumpla con su función de forma constante. En el caso de un Monitor de Radiación Nuclear, se tiene una premisa más, al haber entendido que era la radiación desde sus orígenes, se comprende entonces que el ser humano no puede saber de su presencia utilizando sus sentidos, es decir, no puede detectarla a simple vista, no olerla, ni detectar su presencia de forma alguna. Por esta razón, los monitores de radiación son instrumentos que le permiten al humano poder detectar la radiación nuclear y cuantificar sus características con el fin de utilizarlas en su beneficio.

El monitor de radiación nuclear debe poder cubrir esa brecha y conseguir así la detección de una variable ambiental en cierto punto que resulta tóxica, lasciva y potencialmente mortal, haciendo hincapié de que cumple con una ergonomía tal, que a una persona le resulte práctico cargar o bien, en un entorno industrial, montar en una superficie de interés para que en un área tóxica, no entre ni salga ninguna persona, y que cuando deba hacerlo por mantenimiento, se conozca, realmente si las condiciones son las favorables.

---

---

### 1.1.1 Utilidad de un monitor de Radiación Nuclear

La principal característica que debe tener un dispositivo orientado a la instrumentación electrónica es poder tener certeza de la variable ambiental o digital que se esté buscando. En este caso, un monitor de radiación resulta particularmente útil para todos aquellos operadores que están en contacto con diversas fuentes radiactivas conocidas, saber la concentración en algunas zonas o bien detectar posibles brechas en contenedores.

Pero también, resulta importante para todos aquellos seres humanos que han tenido la mala suerte de convivir con entornos contaminados, algunos de ellos cerca de la central de energía nuclear Vladimir Ilich Lenin después de abril de 1986, o en contenedores clandestinos de desperdicios nucleares. Su utilidad consistiría en conocer las zonas donde se concentre una cantidad de desintegración de material radiactivo mayor y saber de antemano que lugares son mejores para escapar o para los investigadores, donde hay un foco de concentración.

De la misma manera, en EE. UU. Existió una colección de loza llamada “Fiestawear” donde los platos, tazas y teteras tenían un color particularmente atractivo naranja, estos se comercializaban de la manera más normal desde 1950 hasta finales de los 70’s en algunas tiendas, lo interesante era que están construidas estas lozas con 7Kgr Trióxido de Uranio, el cual resulta ser tóxico cuando se tiene contacto con él de forma periódica, al tenerlo como trastes llamativos y al ser almacenados con la loza común, resultaba en un tremendo desastre para las personas que los adquirieron solamente por moda y por color, por lo tanto; ¿Cómo saber si alguna cuestión de uso común en casa está contaminada? Con un monitor de radiación.

Pinturas, tuberías, material de aislamiento para agua potable, en fin, mucho de ello puede resultar estar contaminado, es hasta cierto punto natural, pero al haberse expuesto por mucho tiempo resulta en un problema grave para la salud de los seres orgánicos. Curiosamente, se han encontrado que, algunos de los recuerditos de minerales de las vacaciones, como cristales pirámides etc. Han tenido contaminación y de todas formas se comercializan y se guardan cerca de las habitaciones o incluso, los utilizan en el cuello. Si uno de estos es portado como accesorio por mucho tiempo, resulta en un cáncer “súbito” que con un monitor pudiese haber sido haber detectado y evitado su uso y evitar lo que en la [Figura 1] se muestra, daño a tejidos orgánicos.

Es importante mencionar que los casos donde los suministros u objetos domésticos que tengan contaminación radiactiva hoy en día no son tan comunes, la utilidad de un monitor de radiación es precisamente realizar escaneos fortuitos de algunos de estos objetos que parezcan sospechosos y hacer algo al respecto. ¿Deberían todos tener uno en casa como parte de un botiquín o en la caja de herramientas? Sin lugar a duda, prueba de ello, es la cinta radiactiva que utilizaremos de fuente, una cinta encontrada en un mercado local perteneciente a una luminaria de campamento, es decir, en donde menos se espere una persona, se puede encontrar con algo contaminado radiactivamente.

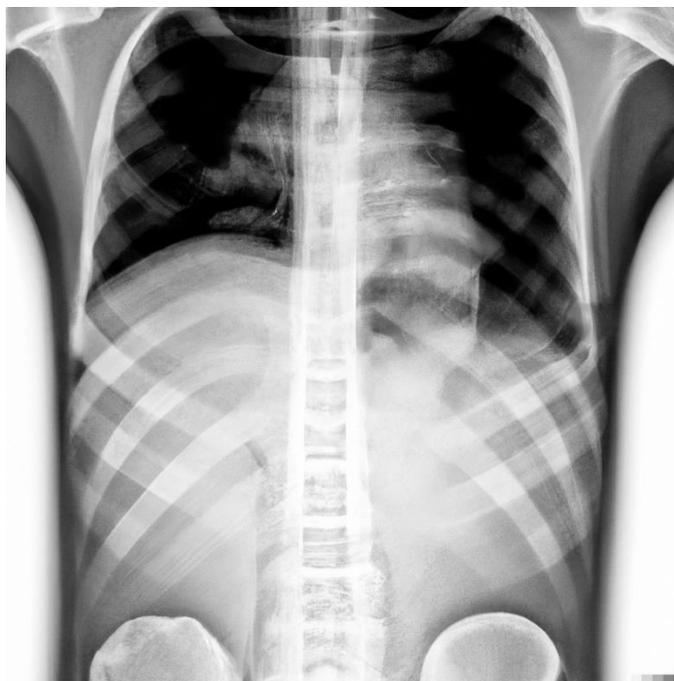


Figura 1 Alusión a daño por radiación (2023) OpenAi.com. Disponible en: <https://labs.openai.com/>.

### 1.1.2 Tipos de variables radiactivas que pueden ser medidas

En este caso, la implementación del Monitor de Radiación Nuclear obedece a un concepto de la Ingeniería Electrónica, en particular de la Instrumentación Electrónica Avanzada que es la escalabilidad o mejora de actualización. Sí, en sentido estricto el monitor solo debe concentrarse en la variable ambiental que nos concierne, que es el decaimiento núcleo-atómico que se produce ya sea en una fuente de radiación o la del medio ambiente. De igual manera resultaría útil en un monitor de este tipo poder captar la temperatura y humedad tratándose de una central nuclear.

En el caso del medio ambiente, la radiación gamma, que es una de las fuentes principales donde se puede encontrar la radiación ionizante, es contribuida por diferentes elementos radiactivos propios del entorno, como la almacenada en la corteza de la Tierra, en dosis más pequeñas pero existentes se encuentra la radiación cósmica, y en los suelos. Algunas partes donde se concentren ciertos minerales o rocas desprenderían radiación a ciertos niveles. De la misma manera los materiales de construcción que incluso con la tecnología moderna, desprenden radionúclidos de forma natural.

Aquí se tiene un concepto de consideración, la Radiación Ionizante y no Ionizante: Si la radiación es entonces energía proveniente de átomos inestables que son sometidos a la desintegración radiactiva, dicha liberación es transmitida en forma de ondas energéticas o partículas, cada una sujeta a propiedades y características únicas según sea.

La Radiación Ionizante, es aquella que tiene tanta energía que es capaz de arrancar los electrones de la capa de valencia de los átomos involucrados, a este proceso se le llama ionización. Este fenómeno es capaz de afectar a los átomos propios de los seres vivos, ya que es capaz de dañar el tejido celular y romper las cadenas de ADN de los genes.

---

---

Donde es posible encontrarse con este tipo de radiación es en las máquinas de Rayos X, polvo, partículas cósmicas, minerales y elementos radiactivos.

La Radiación no Ionizante, es aquella que es capaz de poseer suficiente energía para desplazar los átomos de una molécula, causando vibraciones, pero sin la energía suficiente para la eliminación de los electrones de cada átomo, por ejemplo, las ondas de las estaciones de radio, la luz visible, las ondas de los celulares, etc.

Una vez que se han aclarado este par de conceptos con ayuda de la [Figura 2], entonces se puede entender el tipo de variable que puede ser medida, claro, si el objetivo fuese captar señales satelitales, señales de estaciones de comunicación o de computadores en general, sería otro el enfoque, en particular las variables que interesan son todas aquellas incluidas en la radiación ionizante, entendiendo su precepto, se puede empezar a fraguar las estrategias necesarias para su correcta captación e interpretación.

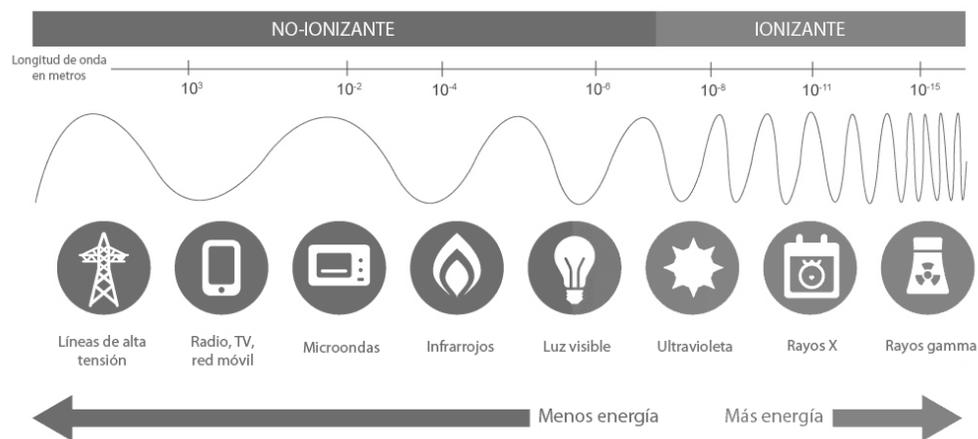


Figura 2. Radiación Ionizante y No Ionizante 2017 Curiosoando. Disponible en: <https://curiosoando.com/wp-content/uploads/2017/02/ionizante-y-no-ionizante.png>.

### 1.1.3 Planteamiento de diseño de los monitores propuestos.

Para este punto, se conoce perfectamente cual es el tipo de dispositivo que se va a implementar y que variables son las que se espera pueda recibir, interpretar y sobre todo reportar. Un aspecto fundamental sobre la radiación ionizante es que, para poder ser captada electrónicamente, se puede hacer el uso de tecnología de vanguardia como la utilizada en la NASA, es decir con cámaras de alta potencia y resolución poder observar el color de cierto tipo de gases, él envió de algunas sondas para poder detectar si en un sistema estelar existe alguna acumulación de radiación cósmica de interés. En el caso de la atmósfera terrestre, resulta más fácil hacer el uso de un elemento en ella, el aire, que es un gas que en sentido estricto es materia, pero que para poder detectar si viajan partículas radiactivas en ella, se requiere de otro tipo de estrategia, en este caso, otro gas.

Por esa razón el principal elemento al diseñar el monitor de radiación es sin duda un Tubo de Gas, en este caso un Tubo Geiger-Müller, más adelante se describirá a totalidad, pero básicamente es el corazón del proyecto, sin él, la detección resultaría imposible. Estos debido a que el tubo Geiger-Müller es el dispositivo que nos convertirá la energía de radiación en una señal eléctrica para su posterior procesamiento por medios electrónicos.

---

---

El monitor que se presentará es de un diseño basado en Hardware Libre (2011) que será modificado para utilizar componentes más de la época y se le añadirán algunos módulos para el reporte y el procesamiento de señales.

El diseño tiene como principal característica el uso de una memoria, para poder recibir la señal analógica el tubo Geiger que le corresponde, convertirla a digital y exportarla en forma de pulsos a un sistema externo junto con un LED para visualmente tener una percepción.

Con esta memoria se puede ampliar más el panorama de diseño para el sistema, permitiéndole poseer más características de las que fue concebido. Al utilizar un tubo Geiger, requiere de ser alimentado con una fuente de alto voltaje, la cual tiene como finalidad generar un campo eléctrico muy alto, lo cual permite que cuando se presente la radiación en el tubo Geiger, el gas contenido en este se ionice y los iones generados puedan ser colectados para generar una corriente eléctrica, medible y procesable por medio de una electrónica asociada. La fuente de alto voltaje se diseñará con componentes discretos, pasivos y activos.

Una vez cubierta la parte esencial del proyecto, podemos trasladarnos al diseño de la electrónica adicional, que tendrá una serie de mejoras y adiciones que lo harán visual y funcionalmente más atractivo, incorporando un Sistema Arduino UNO inicial, una pantalla LCD y después OLED, un teclado matricial 4X4 para ingresar datos, un Encoder rotativo y un sensor de temperatura y humedad. Esto, con la posibilidad de ser considerados como expansión o como sistema final.

## **1.2 Métodos para la cuantificación de datos.**

El sistema tiene como particularidad el empleo de una memoria basada en microcontrolador con memoria Flash y sistema EEPROM con SRAM y arquitectura full-dúplex UART, con esta descripción se tiene claro que se puede realizar el proceso de conversión de señales analógico-digitales en un mismo encapsulado. Aunado a ello, se implementará además un sistema Arduino UNO y luego una evolución a ESP32, cuya programación es capaz de escalar al nivel que se necesita, es decir que se podría realizar la cuantificación de datos directamente en Arduino/ESP32 con el método de detección de pulsos, pero con una electrónica asociada capaz de amplificar esos pulsos, con un arreglo de transistores y capacitores, por ejemplo, hasta que sean suficientes para que las terminales del Arduino o de cualquier otro microcontrolador las detecte.

La cuantificación de datos es sencilla de comprender, un sistema es capaz de reportar los niveles de radiación que se estén sensando, dicho sistema pasa a cobijar al área de programación y electrónica, ya que resulta muy complicado cargar todo el trabajo a la electrónica como se hacía en el siglo pasado, además recordando que uno de los objetivos es hacerlo lo más compacto posible.

Entonces, la manera de cuantificar los datos en el sistema comienza así; Primero se va a utilizar todo el poder de la Memoria para poder realizar diferentes cuestiones, procesar, almacenar, convertir y exportar los datos. Teniendo eso en cuenta, lo segundo será definir variables de programación en la memoria que sean de tipo Volátil, para lograr definir los eventos donde las señales analógicas del tubo Geiger-Müller dan lugar, es decir, no va a ser lo mismo cuando se esté sensando radiación medioambiental que cuando se tenga una fuente calibrada, indudablemente los eventos son distintos y debe de enviar más señales al exterior cuando este último caso ocurra.

---

---

Para conseguirlo, el diseñador original del código ATTINY [Jeff Keyzer] indica en el código de la memoria ATTINY2313-10V que la manera de cuantificar los datos de los pulsos es en forma de ancho de pulso precisamente, es decir, que las instancias de programación son con respecto a cada caso programado.

En un evento se va a tener un bucle (Loop) donde se va a dar tratamiento para cuando se registre que un evento ‘Geiger-Müller’ ha ocurrido, cuando pase y donde la radiación sea muy abundante, tal que el monitor deba procesar todos y cada uno de los pulsos del tubo Geiger. La programación interna debe moverse rápidamente a una instancia capaz de procesar todos esos datos para no caer en sobre flujo y evitar que la memoria no sepa que más hacer con las señales.

Para entenderlo bien, se tienen 3 casos fundamentales de operación, uno cuando el monitor esta encendido y a condiciones ambientales empieza a detectar radiación, luego cuando se esté cerca de un foco generatriz donde la radiación pasa de ser leve a moderada, es decir los pulsos ya son constantes pero no periódicos, y por último que la radiación sea tan alta que los pulsos estén prácticamente uno encima de otro, la forma de tratar a los tres casos evidentemente resulta distinta porque la memoria trabaja con sistemas pertenecientes a los microcontroladores, es el caso de los Prescaler, los envíos de datos a la UART, buffer, los WatchDog Timer, etc.

Todo ello se considera en la programación de Keyzer, él lo aborda en los siguientes casos: Slow CPM y Fast CPM, existe por supuesto un punto medio entre esas dos, y son directamente dependientes del buffer de la memoria, por lo que la Attiny2313 cuantifica los datos con el método de exportación de UART, esto es, en fracciones de milisegundos se toman muestras de los pulsos, luego los clasifica para saber a qué caso pertenecen y respecto a la periodicidad y la frecuencia los cataloga para mandarlos a otro método, uno de conversión analógico-digital.

### **1.3 Desintegración Radiactiva.**

Para comenzar con esta parte de la investigación, hacemos alusión al espectro electromagnético, que es aquel conjunto de datos e ilustraciones que muestran todo lo relacionado a la física de ondas, desde sus frecuencias, el tamaño aproximado de cada partícula, la temperatura que puede esperarse ya sea en la Tierra como en el Universo, y si dichas partículas pueden atravesar nuestra atmósfera. La física de ondas muestra que aquellas que son portadoras de energía y en algunos casos datos a baja frecuencia, tienen baja energía, y en ese caso se consideran ondas de radiación no ionizante, es decir, propagadas por electrodomésticos, centrales de comunicaciones y demás dispositivos los cuales no afectan en ningún motivo al ser humano y seres orgánicos.

Al trasladarse al otro lado del espectro en este caso a la derecha, empiezan a agruparse haciéndolas acreedoras a poseer más energía y por lo tanto frecuencia, muchos de estos entes emisores son ya regulados por órganos gubernamentales porque son utilizados en áreas médicas, de investigación o energéticas, pero su mal uso o descuido las convierte en un arma para el público.

Con ello en mente se conoce que los núcleos se componen por protones y neutrones los cuales mantienen cohesión por un fenómeno llamado ‘Fuerza Fuerte’. Algunos de los núcleos poseen un número de protones y neutrones que no resulta ser físicamente estable, esta inestabilidad tiende a aproximarse a ser estable al emitir ciertas partículas, las cuales son clasificadas respecto al tipo de emisión como  $(\alpha, \beta, \gamma)$  [Figura 3].

---

---

La desintegración radiactiva es de hecho un sinónimo al fenómeno de la radiactividad, básicamente un núcleo atómico inestable perderá energía mediante esas emisiones radiales que hace. Algunos estados nucleares de vida muy corta pero altamente excitados son capaces de decaer a través de emisiones neutrónicas o protónicas.

El proceso de desintegración es meramente estocástico, lo que indica que es altamente aleatorio y el átomo a decaer no puede ser individualmente predicho sin importar el tiempo de la existencia de este. Sin embargo, las experimentaciones han mostrado que la tasa de decaimiento de algunos minerales es de cierta manera constante, lo cual da lugar a tener cálculos característicos de su actividad, nombrada entonces como Vidas Medias, la cual es la base para la datación radiométrica.

Este proceso se lleva a cabo cuando los núcleos de ciertos materiales radiactivos se descomponen de manera espontánea liberando así partículas y radiación propiamente. Ocurre debido a la inestabilidad de los núcleos radiactivos que emiten partículas para lograr estabilizarse y convertirse en un núcleo estable. La desintegración radiactiva, es un proceso natural que ocurre en materiales diversos, minerales como el uranio, el torio, plutonio y en aquellos que pueden ser creados de forma artificial en un reactor nuclear.

Es considerado un fenómeno fundamental de la naturaleza física, y es utilizado en un amplio set de variedades en cuanto aplicaciones. En la medicina moderna, para tratar situaciones mediante exposición controlada como con los radioisótopos. En la Agricultura, y el sector de semillas para conservación, para esterilización de semillas. Industrialmente para detectar fallas en material y equipamiento, o bien para medición de densidades líquidas y sólidas.

La desintegración radiactiva es más sencilla de explicar si se analizan sus aplicaciones, en la ciencia y tecnología, su capacidad de alterar la estructura material y producir así elementos más pesados a partir de otros más ligeros, por ejemplo, conocida como transmutación nuclear o bien, en la datación radiométrica, el cuál es aquel proceso para determinar edad de rocas y fósiles minerales. La desintegración radiactiva permite medir la cantidad de un isótopo radiactivo presente en cierto material y comparar la cantidad que posee de su producto de desintegración para estimar dicha edad. La exposición excesiva a la radiación puede tener los efectos negativos más inimaginables a la vida celular compleja, daño a tejidos, aumento en riesgo de cáncer y esa es la razón principal por la cual se debe tener una monitorización constante cuando industrial o medicamento se utilizan este tipo de elementos. Es importante entender su funcionamiento y sus efectos para poder aprovechar sus aplicaciones y controlar sus posibles riesgos.

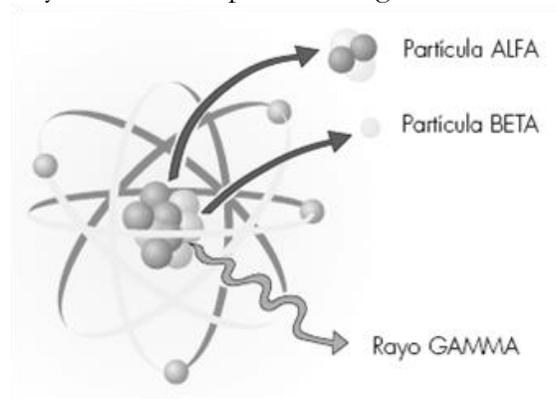


Figura 3. Partícula en desintegración (no date) FisticUS. Disponible en: <http://www.somosfiscus.blogspot.com/2016/emisiones>.

### 1.3.1 Desintegración Alfa $\alpha$ .

Ahora entrando en materia de las diferentes desintegraciones, la primera que se encuentra es el decaimiento Alpha, donde básicamente es un tipo de desintegración radiactiva en la que un núcleo pesado de un elemento se descompone en un núcleo más ligero y dos partículas alfa (núcleos de helio). Durante la desintegración alfa, se libera energía y se reducen la masa y el número atómico del núcleo. La desintegración alfa comúnmente ocurre con los nucleídos más pesados, en teoría solo ocurre en núcleos que resultaron ser más pesados que el Nickel (Elemento #28) donde la energía de enlace global por nucleón ya no es un máximo y, por tanto, los nucleidos son inestables hacia procesos de tipo fisión espontánea como lo mostrado en la [Figura 4].

En este proyecto de tesis se considera la desintegración alfa como un proceso importante en la naturaleza. Durante este proceso, un núcleo de un elemento con un número atómico elevado y una masa elevada se descompone en un núcleo más ligero y dos partículas alfa, que son esos núcleos de helio previamente dichos con dos protones y dos neutrones cada uno. La liberación de partículas alfa también se acompaña de la liberación de una cantidad significativa de energía en forma de radiación electromagnética. Es un proceso importante en la producción de elementos pesados en las estrellas, así como en la radiactividad natural y la producción de energía nuclear.

Con ello en mente, se tiene que las partículas  $\alpha$  son muy grandes y de cierta manera algo pesadas y sin tanta energía para traspasar capas materiales. Los sitios donde puede ser encontrado este proceso de desintegración es en el Americio-241 utilizado en detectores de humo, las partículas de humo ionizan el aire que entra en la cámara iónica y una pequeña corriente es generada mientras fluye, es básicamente un proceso similar al que utiliza el monitor presentado. El Radio-223, el Polonio-210 por decir algunos, son emisores  $\alpha$ .

Para terminar, se llama desintegración alfa debido a las partículas que se liberan durante el proceso, que son partículas alfa. Dichas partículas alfa son núcleos de helio, y el término "alfa" se refiere a la primera letra del alfabeto griego, que se usa como una convención para identificar un tipo de partícula. Tienen una carga positiva y son relativamente pesadas, lo que las hace fácilmente detectables y diferenciables de otras partículas. Por lo tanto, la desintegración es llamada así debido a las partículas  $\alpha$  que se liberan durante el proceso.

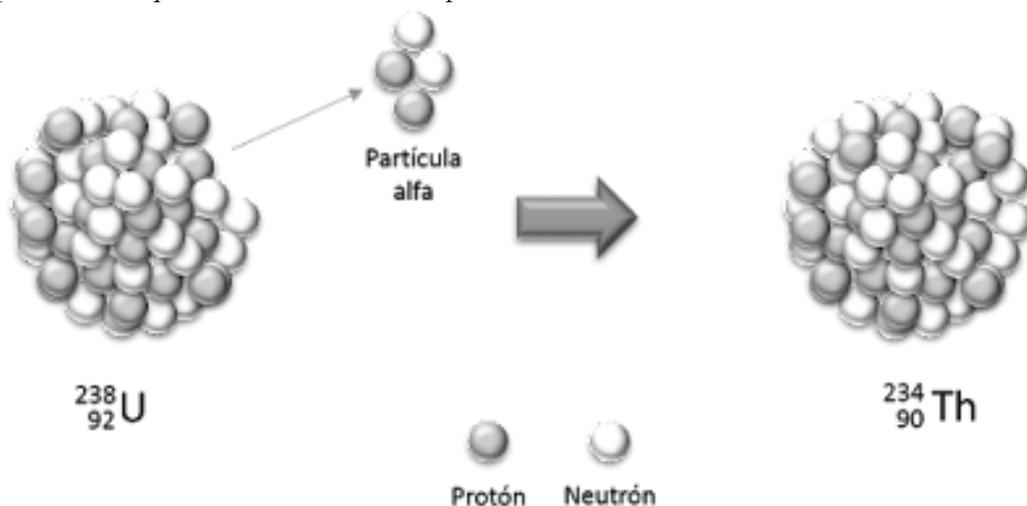


Figura 4. Partícula Alfa en desintegración 2015 Quimicas. Disponible en: <https://www.quimicas.net/2015/08/ejemplos-de-radiacion-alfa.html>.

### 1.3.2 Desintegración Beta $\beta$ .

Continuando, tenemos a la desintegración de tipo beta, el cual es un proceso en el que un núcleo inestable emite un electrón o un positrón y se convierte en un núcleo más estable de un elemento diferente. Este proceso aumenta la estabilidad del núcleo y se utiliza en una variedad de aplicaciones, como puede ser la medicina nuclear y la generación de energía en reactores nucleares.

Es una de las formas en que los núcleos inestables pueden alcanzar una distribución más estable. Durante este proceso, un núcleo emite un electrón y se convierte en un núcleo diferente. La desintegración beta se produce cuando un núcleo tiene un exceso de neutrones, lo que resulta en una fuerza de repulsión que puede ser aliviada mediante la emisión de un electrón.

Además de su uso en la medicina nuclear y la generación de energía, la desintegración beta también es importante en la astrofísica, ya que es responsable de la producción de elementos más pesados en las estrellas. También es un aspecto clave de la teoría del modelo estándar de la física de partículas, que describe cómo interactúan las partículas subatómicas. Este proceso se muestra en la [Figura 5]. Los dos tipos de desintegración beta son referidos como  $\beta^-$  y  $\beta^+$ . En la desintegración beta menos ( $\beta^-$ ), un neutrón se convierte en protón, y el proceso crea un electrón y un antineutrino electrónico; por otro lado, en la desintegración ( $\beta^+$ ), un protón se convierte en neutrón y el proceso crea un positrón y un neutrino electrónico. La desintegración  $\beta^+$  también se conoce como emisión de positrones.

La desintegración beta conserva un número cuántico conocido como número leptónico, o el número de electrones y sus neutrinos asociados. Dichas partículas tienen número leptónico +1, mientras que sus antipartículas tienen número leptónico -1. Puesto que un protón o un neutrón tienen número leptónico cero, la desintegración  $\beta^+$  siendo un positrón, o antielectrón debe de ir acompañada de un neutrino electrónico, mientras que la desintegración  $\beta^-$ , es decir un electrón debe ir acompañada de un antineutrino electrónico.

Para entender esta desintegración se tiene  $\beta^-$  la desintegración del carbono-14 en nitrógeno-14 con una vida media de unos 5.730 años. Dicha desintegración beta recibe su nombre debido a la naturaleza de la partícula que se emite durante el proceso. La partícula emitida es un electrón, también conocido como una partícula beta. La desintegración beta se distingue de otras formas de desintegración radiactiva, como la desintegración alfa y la desintegración gamma, que implican la emisión de partículas diferentes. Por lo tanto, la desintegración beta se llama así debido a la emisión de una partícula  $\beta$  durante el proceso.

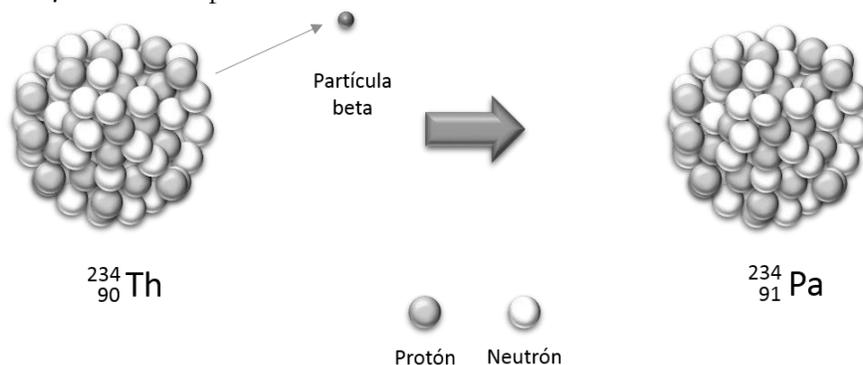


Figura 5 Partícula beta en desintegración 2015 Quimicas. Disponible en: <https://www.quimicas.net/2015/08/ejemplos-de-radiacion-beta.html>.

---

---

### 1.3.3 Desintegración Gamma $\gamma$ .

Continuando, con esta triada de desintegraciones, tenemos al decaimiento o radiación de tipo gamma, el cuál es un proceso nuclear en el que un núcleo excitado emite un fotón gamma de alta energía. Dichos fotones son rayos electromagnéticos de alta frecuencia y longitudes de onda cortas que se propagan en línea recta a la velocidad de la luz. Es utilizada en aplicaciones médicas, como la medicina nuclear, ya que los fotones gamma emitidos por isótopos radiactivos se utilizan para producir imágenes y tratar enfermedades. Y en la investigación para medir y proporcionar información sobre la energía y la estructura de los núcleos.

Es una forma de emisión de radiación nuclear en la que un núcleo excitado se descompone, liberando un fotón gamma de alta energía. Este proceso se produce cuando el núcleo está en un estado excitado con una cantidad excesiva de energía. Para reducir su energía, el núcleo emite un fotón gamma que lleva consigo la energía sobrante.

Como se aprecia, la desintegración gamma se encontraría entonces en algunos sitios donde la actividad energética es inmensa, las fuentes naturales de rayos gamma que se originan en la tierra son principalmente el resultado de la desintegración radiactiva y de la radiación secundaria procedente de las interacciones de la atmosfera con partículas de rayos cósmicos. No obstante, existen otras fuentes naturales poco frecuentes, como los destellos de rayos gamma terrestres, que producen rayos gamma a partir de la acción de electrones sobre el núcleo.

Es importante destacar que la desintegración gamma es un proceso veloz y que los fotones gamma emitidos tienen muy alta energía, lo que los hace muy penetrantes y capaces de atravesar materiales con mucha densidad. Los rayos gamma se producen durante la desintegración gamma, que normalmente tiene lugar después de que se produzcan otras formas de desintegración, como la desintegración alfa o beta. Un núcleo radiactivo puede desintegrarse mediante la emisión de un rayo  $\alpha$  o  $\beta$ . El núcleo "hijo" resultante suele quedar en un estado excitado. A continuación, puede decaer a un estado de menor energía emitiendo un fotón de rayos gamma, en un proceso denominado desintegración gamma como hace alusión la [Figura 6].

Es llamada así debido a que los fotones emitidos en el proceso de desintegración gamma tienen una longitud de onda muy corta, en el rango del espectro electromagnético conocido como gamma. La radiación gamma es una forma de radiación electromagnética y se caracteriza por tener la mayor frecuencia y energía de cualquier otra forma de radiación electromagnética, incluyendo la luz visible, la radiación ultravioleta, la radiación infrarroja, etc.

El nombre "radiación gamma" se originó en la década de 1900 como parte de la clasificación de la radiación electromagnética por orden de frecuencia y energía. La radiación electromagnética se clasifica en seis categorías, desde la radiación de radio con la frecuencia y energía más bajas hasta la radiación gamma con la frecuencia y energía más altas. La radiación  $\gamma$  es la forma más penetrante y poderosa de radiación electromagnética.

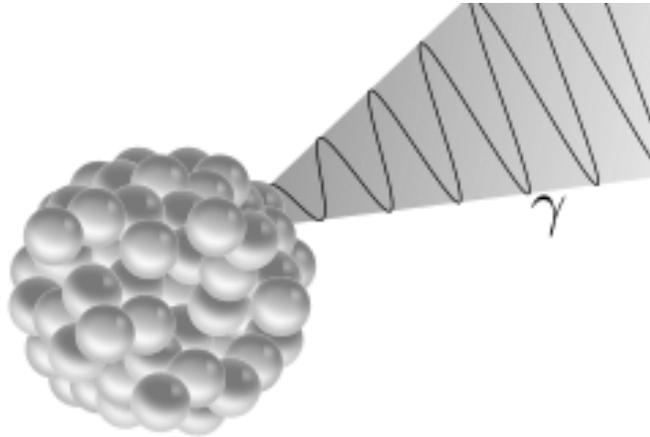


Figura 6. Fotón Gamma en desintegración. Wikipedia. Available at: [https://es.wikipedia.org/wiki/Rayos\\_gamma](https://es.wikipedia.org/wiki/Rayos_gamma).

#### 1.4 Rayos X (*Origen Atómico*).

Para terminar con esta primera sección de conceptos físicos, es importante señalar que los rayos X no entran como tal en la triada de clasificaciones vistas previamente, esto es debido a que son un tipo de radiación electromagnética de alta energía y una corta longitud de onda capaces de atravesar materiales opacos. Utilizados en medicina para producir imágenes de los tejidos internos del cuerpo como en la [Figura 7], así como en la industria para inspeccionar materiales. No obstante, también pueden ser perjudiciales si se exponen a niveles elevados de radiación de rayos X, por lo que se requiere precaución y protección adecuada durante su uso.

La exposición a niveles elevados de radiación de rayos X podría resultar ser perjudicial para la salud, especialmente para los tejidos blandos y los órganos sensibles. Consiguientemente, se requiere precaución y protección adecuada durante su uso, especialmente en aplicaciones médicas donde se busca minimizar la dosis de radiación recibida por el paciente. Son producidos en el interior de un tubo de vidrio, en el que se ha hecho un alto vacío, y donde se aplica un voltaje de aproximadamente de 50 a 150 KV. El cátodo se calienta cuando hacemos pasar una corriente entre sus extremos, para que se produzca una emisión de electrones por efecto termoiónico. En resumen, los rayos X son una herramienta valiosa en muchas áreas, pero es importante usarlos con precaución y protección adecuada para minimizar los riesgos para la salud.

Fueron descubiertos por el físico alemán Wilhelm Conrad Roentgen en 1895, y él los llamó así porque su naturaleza y propiedades eran desconocidas en ese momento. La X en "rayos X" se refiere a la incógnita o al carácter desconocido de la naturaleza de la radiación. Con el tiempo, los rayos X se identificaron como un tipo de radiación electromagnética. Para fines de esta tesis, no se abordará en el monitor la detección de rayos X porque no son en esencia conseguibles sin muchas características de por medio, Es decir, para conseguirlos se necesitaría una cámara especial con permisos especiales simplemente para producirlos, y en sentido estricto no se encuentran en la naturaleza o en la tabla periódica, aunque el tubo Geiger utilizado si respondería a su presencia.



Figura 7. Rayos X, fuente sólida (2023) OpenAi.com. Disponible en: <https://labs.openai.com/>.

### **1.5 Detección de la Radiación Nuclear**

El propósito de la detección de la radiación nuclear en la ingeniería electrónica, específicamente para fines de esta tesis, es el uso de instrumentos especializados para medir la cantidad de radiación ionizante presente en un área. Estos instrumentos de detección incluyen y podrían ser: detectores de centelleo, detectores de gases, detectores de cristal líquido y detectores de película, por decir solo algunos. La detección de radiación nuclear se utiliza en una específica variedad de aplicaciones, como la medicina nuclear, la seguridad nuclear y la investigación científica. La precisión y la sensibilidad de la detección de radiación dependen estrictamente del tipo de detector utilizado y de las condiciones ambientales.

Resulta ser importante porque la radiación ionizante llega a tener efectos perjudiciales en la salud humana y el medio ambiente. La exposición a dosis elevadas de radiación como ya se ha mencionado, puede ser perjudicial. Este concepto se aborda, porque es el punto de partida para garantizar la seguridad en instalaciones nucleares, en la industria y en situaciones de emergencia diversas.

Además de los detectores de radiación, existen también sistemas de alarma y monitoreo que se utilizan para garantizar la seguridad en las instalaciones nucleares. Dichos sistemas pueden incluir sensores de radiación estáticos, sistemas de advertencia y sistemas eléctricos de tipo Back-Up para garantizar la continuidad de la detección de radiación en caso de falla de otros sistemas. Esto es esencial para garantizar la seguridad y proteger la salud humana y el medio ambiente. La tecnología y los instrumentos utilizados para la detección de radiación seguirán su evolución.

---

---

Como se abordó en las secciones anteriores, la radiación ionizante, hace que los átomos y las moléculas que tienen carga eléctrica, la radiación ionizante y sus tipos tienen consistencias directas en cómo pueden ser detectadas. Para quedar claros, en el caso de la radiación  $\alpha$  al ser partículas muy grandes, y que no lleven tanta energía y que, de antemano, se conoce por los estudios ya generados que no tienen una penetración radial suficiente en los materiales, es decir, que una partícula de este tipo quizá no podría traspasar el grosor de un par de guantes de hule o una hoja de papel.

Pero, si se ha de tratar de un rayo  $\gamma$  donde sabemos que son muy energéticos y poderosas, capaces de penetrar cierta anchura de un muro de concreto, entonces la estrategia de detección sería otra. Por supuesto que hay un antecedente lógico en esto, que si las radiaciones de tipo  $\gamma$  son más energéticas entonces son más fáciles de detectar, más peligrosas sí, pero al traspasar muchas capas materiales, quizá se piense que  $\alpha$ ,  $\beta$  &  $\gamma$  son excluyentes entre sí en este sentido. La verdad es complicada responder en este momento, porque si se ha de detectar alguna partícula radiactiva, se tiene que determinar el tipo de detector a utilizar, con ello se respondería la parte de ¿Cualquier medición va a ser efectuada correctamente, sin importar a cuál decaimiento pertenezca?

Además, que un monitor como el planeado realizar no sería capaz de determinar el tipo de decaimiento ni del mineral o material que lo cause, se abordará más adelante la razón, y, por último, resaltar que la detección se realizaría en un ámbito enteramente controlado.

## 1.6 Detectores Gaseosos

En esta parte, analizaremos la cuestión existente de los insumos disponibles en la actualidad en cuanto a detectores de radiación de tipo gaseoso que cumplan con el objetivo de ser económicos. En primer lugar, es de suma importancia recalcar, que se le pueden referir a estos dispositivos como detectores de ionización gaseosa. Bien, estos dispositivos funcionan bajo los principios de la física de partículas, donde la propia detección se produce en presencia de las partículas ionizantes que atraviesan al detector y estos generalmente construidos a base de gas, si las partículas poseen suficiente energía para ser capaces de ionizarlo, es producida entonces una pequeña trayectoria electrónica, la señal que se generaría, sería captada por algún otro medio, puede ser de tipo circuital, de tipo sensorial, de tipo instrumental como los osciloscopios, o por campos eléctricos.

El principio de funcionamiento es sencillo de explicar, primero, los electrones generados por la ionización son trasladados hacia el ánodo y la parte iónica al cátodo, por lo que la carga que será medible y transportada es generalmente, directamente proporcional a la energía inicial de cada una de las partículas.

Los detectores de este tipo poseen varias características únicas que los diferencian entre sus tipos. En primer lugar, estos dispositivos pueden detectar varias formas de radiación gaseosa mucho más rápido que los equipos de rayos X convencionales. Esto se debe al hecho de que los detectores gaseosos utilizan, por ejemplo, argón líquido o neón como fuente de gas ionizado en lugar de las fuentes sólidas de rayos X. Dado que el gas líquido es mucho más maleable que el gas sólido, este método de medición es mucho más rápido y preciso. Otras ventajas incluyen el hecho de que los gases líquidos no requieren un recipiente de contención de metales pesados y pueden manipularse mucho más cerca de su fuente que dichas fuentes sólidas de rayos X.

---

---

Además, los radionucleidos líquidos gaseosos se pueden medir con resoluciones espaciales más finas que las fuentes sólidas de rayos X, lo que les otorga una sensibilidad mucho mayor por unidad de masa.

Existen muchos tipos diferentes de detectores gaseosos, y algunos están diseñados específicamente para medir niveles altos de alfa y la exposición a la radiación beta y gamma. Estas máquinas pueden medir formas de contaminación radiactiva gaseosa exógena (*ERCa*) tanto de corta como de larga duración. Muchos países desarrollados determinaron que La radiación Gamma es de tipo electromagnética y altamente penetrante, las Alfas y los neutrones son partículas. Esto es a razón que estos tipos de emisiones también producen rayos gamma, aunque los rayos gamma son mucho más peligrosos ya que son más penetrantes que las emisiones alfa o de neutrones. No es posible detectar neutrones de manera directa, por lo tanto, los detectores gaseosos por sí solos no detectan neutrones.

Al igual que con cualquier campo científico cuando se trata de medir formas peligrosas de energía, actualmente no existe una manera fácil de auto detectar estas emisiones dañinas utilizando métodos comunes como colocar un reloj analógico con un movimiento de conteo de masa atómica bajo. Sin embargo, las nuevas tecnologías en este campo podrían revolucionar nuestra comprensión y capacidad para mitigar estas amenazas críticas en el futuro si buscamos estas vías más en el desarrollo.

Muchos científicos trabajan diligentemente todos los días para crear nuevas formas para que las personas se protejan de las emisiones de gases peligrosos en el mundo cambiante de hoy. La creación de dispositivos económicos que miden altos niveles de contaminación radiactiva gaseosa es una de las formas en que los científicos de todo el mundo están logrando este objetivo. Sin embargo, las personas deberían de tomar conciencia de estas nuevas tecnologías para que puedan usarlas para protegerse de la peligrosa exposición a la contaminación radiactiva en todo el mundo.

Entonces, para focalizar el concepto, los monitores de radiación son dispositivos utilizados para detectar la presencia de gases y materiales radiactivos en el medio ambiente. Utilizados, como apoyo en centrales nucleares, instalaciones médicas y emplazamientos industriales. Están diseñados para detectar la presencia de gases radiactivos, como el radón, el criptón (Algunos isótopos) y el xenón (Solo ciertos isótopos como  $Xe^{-131}$ ) eso sí, dependiendo sus capacidades, ya que funcionan midiendo la cantidad de radiación emitida por el gas radiactivo. A continuación, el detector envía una señal de excitación cuando el nivel de radiación supera un umbral predeterminado, tanto por el propio detector gaseoso como por alguna electrónica asociada embebida. Esto permite una rápida detección y respuesta ante cualquier peligro potencial.

Estos dispositivos, como los mostrados en la [Figura 8] poseen formas y tamaños muy variados, dependiendo de la aplicación. Por ejemplo, algunos están diseñados para ser colocados en una habitación o zona para detectar la presencia de gases radiactivos, mientras que otros están pensados para ser llevados por el personal para detectar la presencia de gases radiactivos en su proximidad inmediata como el de la [Figura 9]. Los detectores de gases radiactivos suelen utilizarse junto con otras medidas de seguridad, como ropa protectora y respiradores. Esto ayuda a garantizar que el personal esté adecuadamente protegido de cualquier riesgo potencial de radiación.



Figura 8. Detector Gaseoso de Centelleo POLIMASTER PM1403. Directindustry. Disponible en: <https://www.directindustry.es/prod/polimaster/product-23674-1633890.html>.



Figura 9. Cámara de Ionización LudLum 9DP-Cole. Colecr. Disponible: <http://colec.com/producto/camara-ionizacion-ludlum-modelo-9dp>.

### 1.6.1 Tubo Geiger-Müller

Aquí entra la súper estrella de este proyecto, el dispositivo elegido para detectar los decaimientos radiactivos circundantes, resulta ser el dispositivo tubular Geiger-Müller, el cuál es un elemento de ingeniería bastante curioso y complejo, pero a la vez sencillo de comprender. En la ingeniería de instrumentación, se le conoce como un dispositivo capaz de lograr la detección de radiación ionizante.

---

---

El tubo Geiger-Müller es un tipo de detector empleado para medir la cantidad de radiación ionizante presente en una muestra, ya sea mineral, material o espacial.

Está compuesto por un tubo cerrado lleno de gas a baja presión y un electrodo central rodeado por una malla electrónica. Cuando una partícula ionizante entra en el tubo, ioniza el gas y crea un flujo de electrones libres. Estos electrones se atraen hacia el electrodo central y producen una corriente eléctrica que puede ser medida y utilizada para determinar la cantidad de radiación presente. El tubo Geiger-Müller es uno de los detectores de radiación más utilizados debido a su simplicidad, fiabilidad y bajo costo.

Con ello en mente y además de su uso en la medición de la radiación, los tubos Geiger-Müller también se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones, como la protección radiológica, investigación nuclear y medicina. Sus capacidades le permiten utilizarse para monitorear la exposición a la radiación en el trabajo o para detectar la presencia de materiales radiactivos en la naturaleza.

Se utilizan en los contadores de radiación, los cuales son dispositivos portátiles utilizados como medidores de radiación en ambientes industriales, médicos y domésticos. Dichos contadores pueden proporcionar una lectura instantánea de la cantidad de radiación presente y ayudar a garantizar la seguridad en ambientes donde la radiación puede ser un problema. Es importante señalar que los tubos Geiger-Müller no son capaces de identificar la fuente de la radiación o determinar su energía. Para estos propósitos, se utilizan otros tipos de detectores de radiación, como los detectores de espectrometría gamma o los detectores de centelleo, o cámaras calibradas de investigación, de igual manera salas de irradiación.

El Tubo Geiger-Müller es un componente clave en la medición de la radiación y una herramienta valiosa en la protección contra la radiación. Por protección precisamente es referencia a prevención, la radiación en dosis muy esporádicas no resultaría ser en todos los casos esencialmente mortal, por lo que es excelente para lograr el cometido de prevención y protección. Hay muchas variedades de ellos, cada uno pensado para su particular aplicación, y es que es uno de los detectores de radiación más antiguos y ha sido desarrollado, mejorado y optimizado desde su creación en la década de los 1920's. Fue inventado por Hans Geiger y Walter Müller en 1928 y se convirtió en una herramienta indispensable para la investigación nuclear y la protección contra la radiación.

Antes del tubo Geiger-Müller miniaturizado, los detectores de radiación eran incómodos y poco fiables por que necesitaban electrónica mayor, lo que dificultaba la medición de la radiación por cargar dispositivos grandes. La creación del tubo Geiger-Müller miniaturizado permitió una medición mucho más precisa y fácil de realizar, impulsando el desarrollo de la física y tecnología nuclear. Desde entonces ha sido perfeccionado y mejorado, aún resulta ser un componente clave en la física de partículas.

Hablando del principio de funcionamiento grosso modo de este dispositivo, utiliza primeramente un fenómeno físico llamado "Avalancha de Townsend" el cual es una manifestación producida en materiales eléctricamente conductores, incluidos gases. Se produce cuando un campo eléctrico suficientemente fuerte ioniza los átomos o moléculas del gas, creando electrones libres e iones positivos. Estos electrones libres a su vez pueden ser acelerados por el campo eléctrico y colisionar con otros átomos o moléculas, generando más electrones libres e iones positivos en un proceso de cascada que se conoce como avalancha.

---

---

Este proceso es importante porque será el principio físico utilizado en el proceso de detección de materiales radiactivos. En este caso, la avalancha de Townsend se utilizará para amplificar la señal eléctrica en el dispositivo haciéndolo detectable a partir de esa pequeña señal como lo es un efímero evento ionizante en presencia de una partícula radiactiva. En sentido estricto, los tubos son capaces de detectar la tríada de decaimientos mencionada con anterioridad ( $\alpha, \beta, \gamma$ ) recordando que no pueden detectar neutrones, pero el tubo que estas utilizando si puede detectar rayos X, porque si detecta rayos Gamma, evidentemente los rayos X también los va a detectar.

Llamándole Tubo Geiger-Müller a todo el conjunto de modelos, es necesario recalcar que en un aproximado del 90% de los que existen en el mercado, son robustos y de relativo bajo costo, algunos de ellos tienen configuraciones variadas, de ellas, muchos no pueden medir dosis constantes de alta radiación, no de forma finita y eficiente, además que algunos tienen vida útil determinada en zonas de alta radiación y constante, y hasta la fecha de realización de este documento, no son capaces de detectar energía de radiación incidente, es decir no son espectrómetros y no logran determinar el material, el mineral ni el tipo de radiación, llámese ( $\alpha, \beta, \gamma$ ).

Brevemente, explicando ese punto de los tipos de tubo, solo existen de forma general, dos formas de poder concebirlos. El primero, sería “De tipo ventana” Es en este modelo, donde conserva una forma tubular geométrica y allí en una parte tiene una abertura, donde recubre al material del tubo y facilita la penetración de la radiación de muy baja energía, por lo que estos tubos son empleados para detectar radiaciones de tipo  $\alpha$ .

Ahora bien, hay tipos de ventanas, dos en realidad, el primero es de paredes gruesas, cuyo principal fin es la detección  $\gamma$  de alta energía, teniendo un espesor de 1-2 mm, por lo que, con esto en mente, se emplean para aplicaciones rudas, cada polo tiene anillos de compensación de energía para poder soportar la carga iónica. Luego, los de pared delgada utilizados para radiación  $\beta$  de alta energía y  $\gamma$  de baja energía y algunos con rayos X, no logran detectar  $\alpha$  porque las paredes no son lo suficientemente delgadas para detectarlas a menos que sea a muy corta distancia y eso algunas veces. Por último, el Tubo Pancake, que es una variante para lidiar con contaminación  $\beta, \gamma$  Con sensibilidad alta, con forma de disco, y capas de mica capaces de tener adaptaciones entre ellas y su espacio de gas para incluso detectar  $\alpha$ .

### **1.6.2 Etapa de Descarga Geiger (Funcionamiento)**

A principio de cuentas, los tubos necesitan por supuesto, energía para poder operar, el voltaje preciso para que funcionen los tubos Geiger-Müller depende de varios factores, como el tipo de tubo, el gas que contiene y la presión del gas. En general, se requiere un voltaje de alrededor de 400 a 600 V entre el electrodo central y la malla electrónica para que los tubos funcionen de manera efectiva. Sin embargo, es importante destacar que son dispositivos muy sensibles y que el voltaje aplicado puede afectar la precisión de la medición. Por lo tanto, es importante utilizar un voltaje adecuado y estable para obtener una medición precisa de la radiación.

En general, el circuito electrónico externo que se utiliza para amplificar la señal de los tubos Geiger-Müller también se encarga de controlar y estabilizar el voltaje aplicado a los tubos. Este circuito electrónico puede ser parte de un contador de radiación o de un sistema de medición de radiación más complejo, el cual es el punto medular de esta tesis, ese diseño propiamente.

---

---

El tubo Geiger-Müller posee un funcionamiento físico sencillo de entender, primero, retomando conceptos anteriores, se basa en la ionización. Un tubo Geiger-Müller trabaja en entorno cerrado lleno de gas a baja presión y un electrodo central rodeado por una malla electrónica. Cuando una partícula ionizante, como una partícula ( $\alpha, \beta$ ) o fotón gamma, entra en el tubo, ioniza el gas, significa que saca electrones de las moléculas de gas. Estos electrones libres se atraen hacia el electrodo central y producen una corriente eléctrica relativamente pequeña.

Esa cantidad de corriente eléctrica que se produce depende de la cantidad de radiación presente, por lo que la medición de la corriente eléctrica puede utilizarse para determinar la cantidad de radiación presente con una electrónica asociada pertinente. Además, el tubo Geiger-Müller es sensible a la radiación ionizante, pero es insensible a la radiación no ionizante, como la luz visible o el calor. Lo hace ideal para la medición de la radiación ionizante de intensidad variable, ya que permite una lectura precisa sin ser afectado por otras formas de radiación.

El principio de funcionamiento se basa en la generación de pulsos eléctricos cuando sucede un evento de ionización. Ocurre principalmente, con estas consignas:

- 1.- **Carga eléctrica:** El tubo Geiger-Müller está cargado eléctricamente para que el electrodo central sea positivo y la malla sea negativa. Esta configuración crea un campo eléctrico que atrae a los electrones libres hacia el electrodo central.
- 2.- **Ionización:** Cuando una partícula ionizante entra en el tubo, ioniza el gas o gases internos al extraer electrones de las moléculas de gas. Los electrones ionizados son atraídos por el campo eléctrico hacia el electrodo central.
- 3.- **Detección de radiación:** La cantidad de electrones ionizados que se mueven hacia el electrodo central depende de la cantidad de radiación presente. Cuanta más radiación haya, más electrones se ionizarán y más corriente eléctrica se producirá. La medición de la corriente eléctrica es, por lo tanto, una medida de la cantidad de radiación presente.
- 4.- **Amplificación:** La corriente eléctrica producida por los electrones ionizados puede ser muy pequeña, así mismo las formas de onda resultantes, por lo que se suele amplificar antes de ser medida. Esto se hace utilizando un circuito electrónico externo que multiplica la corriente eléctrica antes de ser medida por un instrumento de medición, como un multímetro o propiamente un contador de radiación.
- 5.- **Umbral:** Los tubos Geiger-Müller tienen un umbral de detección, que es la cantidad mínima de radiación que se requiere para producir una señal detectable. Esto significa que los tubos Geiger-Müller son más sensibles a ciertos tipos de radiación que a otros. Algunos tubos les resultan ser más sensibles a las partículas  $\alpha$  que a las partículas  $\beta$  o  $\gamma$ .

En síntesis, se compone el gas inerte en el tubo Geiger-Müller a bajas presiones, cuando existe una ionización este gas, genera un voltaje y corriente adecuados a su modelo, posteriormente en las paredes del tubo con superficie interior recubierta con fibras o láminas conductoras para formar al cátodo (+) y el ánodo, formado por otra fibra para el centro de la cámara del tubo.

---

---

Si se golpea el tubo con la radiación ionizante, las moléculas del gas resultan ser ionizadas e inciden directamente o indirectamente por los electrones secundarios que en los muros del tubo, generando iones con carga positiva y electrones libres (par iónico) en el gas sobre la estructura, el campo generado por los electrodos del tubo acelera los iones positivos al cátodo y los electrones al ánodo, en la avalancha generada, se entiende por qué se necesita un alto voltaje pero baja corriente, ¿Por qué se necesitaría un voltaje de 200-600V y 1-5mA para la detección?

Es debido a los eventos, las avalanchas de energía que se producen se van trasladando alrededor del tubo, eso sería iniciando desde el evento ionizante original, con las moléculas excitadas, y con la consigna de tener múltiples avalanchas, todo ello se debe a los fotones en la avalancha original, por lo que las múltiples avalanchas no son afectadas por el campo eléctrico, moviéndose lateralmente con respecto al eje del ánodo, invocando eventos ionizantes de nueva cuenta por colisión molecular gaseosa.

Ese evento de múltiples avalanchas es el causante de la producción fotónica, donde la velocidad de propagación es variable dependiendo cada tubo, pero generalmente cada ionización completa del gas alrededor de las paredes toma solo unos cuantos  $\mu\text{s}$ . Este resultado provoca precisamente que se de un evento adicional producto de la suma de los eventos anteriores de avalancha, es decir, que cada ionización genera un evento total de avalanchas el cual, sale en forma de pulso, el cual, afortunadamente, se sabe que un pulso, es contable y amplificable, pero antes de ello, debe pasar por una resistencia eléctrica para poder estabilizar electrónicamente el pulso.

De allí es generada la descarga Geiger, donde por efecto de los iones (+) tienen una movilidad reducida respecto a los electrones libres dado su aumento de masa en el área del filamento del ánodo. Cada que sucede, se consigue una carga capaz de contrarrestar el campo eléctrico necesario para futuras avalanchas, entonces cada pulso resultante siempre será continuo cada vez, con el mismo pico energético y magnitud, pero independiente del contenido energético de cada partícula detonadora de los eventos.

Ello, nos indica que, al obtener solamente pulsos, es decir, picos, flancos de subida y bajada efímeros, no podemos tener datos sobre el tipo de material, mineral o elemento que detona la radiación, he allí la razón por la cual, para esta tesis, nos limitamos a solo el diseño electrónico bajo esta consideración naciente del tubo Geiger-Müller tanto en concepto como de modelo utilizado (SBM-20) como se hace alusión en la [Figura 10] donde una partícula ionizada se mueve.

Bien, por último, la presión del gas es quien ayuda a generar todas y cada una de las avalanchas de los eventos. Si se diera el caso, que el tubo tuviese una falla, y el gas no tuviera la presión adecuada, se reduciría su eficiencia de conteo y de interacción física espacial general con la radiación, en caso de que sea una presión superior a la normal, los choques de electrones acelerados y el reabastecimiento gaseoso, resulta en una falta de suministro energético entre cada colisión para lograr la ionización gaseosa.

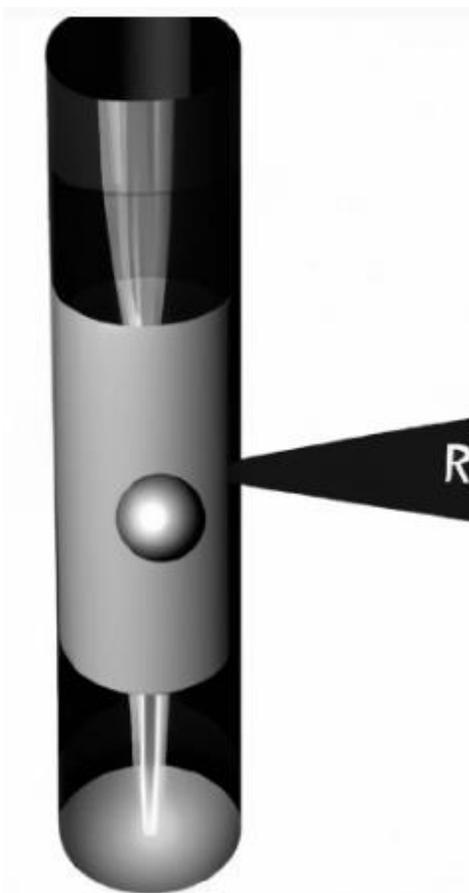


Figura 10 Tubo Geiger Operando (2023) OpenAi.com. Disponible en: <https://labs.openai.com/>.

### 1.6.3 Gases Utilizados

El elemento clave del funcionamiento de estos dispositivos que se utilizan para detectar radiación ionizante y suelen estar llenos de gas a alta presión son los gases internos que hacen todo el trabajo molecular. En general, existen varios tipos de gases que se pueden utilizar en los tubos Geiger-Müller, por mencionar algunos:

- 1.- **Aire:** Este es uno de los gases más comunes utilizados en los tubos Geiger-Müller, ya que es barato y fácil de obtener. Sin embargo, el aire no es el más sensible de los gases y puede ser menos efectivo para detectar radiaciones de baja energía, es empleado en algunas radiaciones medioambientales.
- 2.- **Helio:** Es un gas noble que se utiliza en algunos tubos porque es más sensible que el aire. Sin embargo, el helio es más caro que el aire y es menos comúnmente utilizado.
- 3.- **Argón:** Gas noble que se utiliza en solo algunos tubos debido a su sensibilidad y fiabilidad. El argón es un gas más costoso que el aire o el helio, pero ofrece una mayor sensibilidad a la radiación.

- 
- 
- 4.- **Xenón:** Es un gas noble que es utilizado debido a su sensibilidad y fiabilidad. Es un gas más costoso que el aire, el helio o el argón, pero ofrece una mayor sensibilidad a la radiación y una mayor estabilidad en comparación con otros gases.
  - 5.- **Níquel:** En forma gaseosa, que se utiliza en algunos tubos Geiger-Müller, es debido a su alta sensibilidad a la radiación. Sin embargo, el níquel es un gas tóxico y puede ser peligroso si se inhala, por lo que se utiliza con precaución.
  - 6.- **Freón:** Gas que se utiliza esporádicamente en algunos tubos debido a su alta sensibilidad a la radiación y su estabilidad. Sin embargo, el freón es un gas de efecto invernadero y es un contaminante del medio ambiente, por lo que su uso se está desaconsejando en la actualidad.
  - 7.- **Nitrógeno:** En estado gaseoso se utiliza debido a su disponibilidad y bajo costo. Sin embargo, es menos sensible a la radiación que otros gases y puede ser menos efectivo para detectar radiaciones de baja energía.
  - 8.- **Mezcla Penning:** es una combinación de gases que se usa para detectar radiación ionizante. Esta mezcla se compone de dos gases nobles, como el neón y el helio, y un gas no noble. La mezcla de Penning se utiliza debido a su alta sensibilidad y fiabilidad en la detección de radiación.

En general, los gases utilizados en los tubos Geiger-Müller se seleccionan en función de la aplicación y los requisitos de detección de radiación. También en función de la sensibilidad, fiabilidad y costo de los gases. Es importante señalar los riesgos ambientales y seguridad al elegir un tubo con cierto gas. Básicamente, lo que se tiene aquí, es que las combinaciones, o uso singular de gases, es dependiendo del objetivo, y muchos tienen tiempos de vida mayores a otros y el requerimiento voltaico suele ser mayor o menor. Actualmente los tubos de gas halógeno son los más utilizados, los más desarrollados por los procesos de descarga que poseen, sin embargo, el costo es mayor. El tubo SBM-20 utilizado posee una combinación de gases:  $\text{Ne} + \text{Br}^2 + \text{Ar}$

#### 1.6.4 Meseta Geiger-Müller

La Meseta Geiger-Müller es una característica técnica de los tubos Geiger-Müller que se utilizan para detectar radiación ionizante. La Meseta describe la relación lineal entre la corriente de salida del tubo y la intensidad de la radiación ionizante. En un tubo Geiger-Müller, la corriente de salida aumenta linealmente con la intensidad de la radiación ionizante hasta alcanzar un límite. A partir de ese momento, la corriente de salida se mantiene constante, independientemente de la intensidad de la radiación, formando así la Meseta Geiger-Müller. La corriente constante en la Meseta es precisamente la corriente de avalancha.

La Meseta es una característica importante de los tubos Geiger-Müller porque permite una medición precisa de la intensidad de la radiación ionizante. Además, la Meseta ayuda a proteger el tubo Geiger-Müller de daños debido a la exposición a radiaciones intensas. Es entonces un rango físico de tensión donde se garantiza la operación correcta del tubo, dado que al exponerse de forma continua a una serie de eventos ionizantes intensos y constantes, la tensión se incrementa gradualmente, donde si se aprecia gráficamente la corriente iónica la región Geiger, tiene un aplanamiento geométrico en su gradiente, ello es la Meseta.

Representa una característica técnica de los tubos Geiger-Müller que describe la relación lineal entre la corriente de salida del tubo y la intensidad de la radiación ionizante. La Meseta permite una medición precisa de la intensidad de la radiación y protege el tubo Geiger-Müller de daños debido a la exposición a radiaciones intensas. Y dependiendo de las características del tubo, sea construcción, materiales, longitud, grosor, gas, cada uno de los sets de rangos serán variables, el voltaje aquí es muy intenso, capaz de generar múltiples avalanchas, un bajo voltaje, no es suficiente para causar una descarga Geiger en el filamento del ánodo. Cada descarga Townsend particular resulta ser el producto de ello, ahora, si el voltaje es mayor que la meseta, se produce una descarga continua, de tipo fotónica luminiscente, dando pie a que el tubo no pueda continuar la detección.

Geoméricamente, la meseta tiene un ligero declive por el aumento sensible radiactivo de baja energía cuando aumenta el voltaje, es decir, que, en situaciones de operación cotidianas, una partícula ioniza átomos de gas, produciendo ionización. Pero, cuando una estructura molecular de baja energía tiene un evento similar, la energía cinética además de la potencial del voltaje, se produce una insuficiencia para el requerimiento de avalancha, recombinando con el ion de esta característica.

Como se aprecia en la [Figura 11], en el caso, de que una partícula o molécula, si el voltaje se eleva, el umbral es la última muestra de vida antes de caer, la sensibilidad se eleva, produciendo la pendiente, por lo que, al siguiente conteo, se variará ligeramente, cuando el voltaje que se aplica también es variado, por lo que una forma de eludir este efecto, se utiliza tensión continúa invariable, sin que la fuente de alto voltaje suministradora sufra cambios abruptos en su flujo energético.

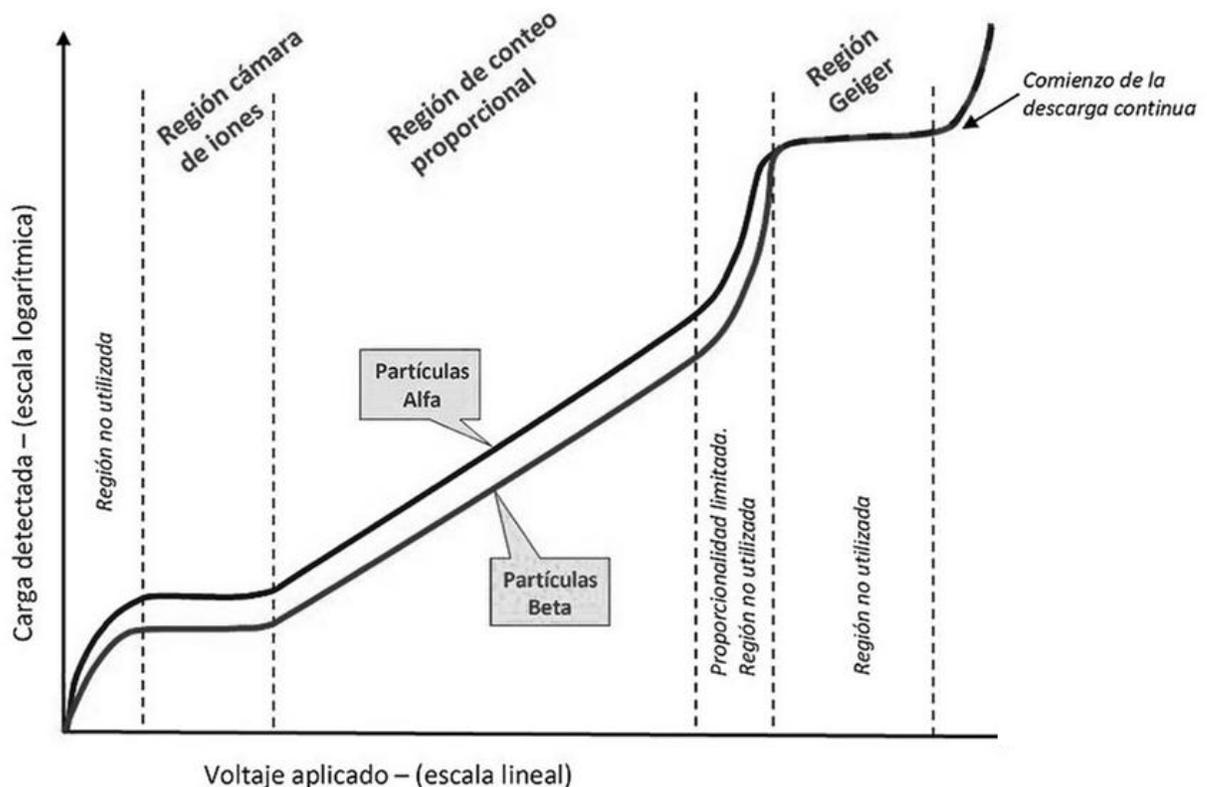


Figura 11 Diagrama de Pares Iónicos (2021) Wikipedia. Available at: [https://es.wikipedia.org/wiki/Tubo\\_Geiger-M%C3%BCller](https://es.wikipedia.org/wiki/Tubo_Geiger-M%C3%BCller).

---

---

### 1.6.5 Comportamiento Temporal, extinciones y repliegues

En esta sección, se determina el concepto de cómo es que cada molécula, partícula se comportan en el sistema Geiger-Müller respecto a cada excitación y avalanchas. En primer lugar, la llamada extinción de los tubos Geiger-Müller se refiere a la disminución de la sensibilidad del tubo a la radiación ionizante con respecto al tiempo. La extinción puede ser causada por varios factores, como la acumulación de impurezas en el interior del tubo o la exposición prolongada a radiaciones intensas sin que el tubo lo especifique.

La extinción de los tubos Geiger-Müller puede ser compensada mediante la realización de un proceso de calibración periódico. Durante este proceso, es medida la corriente de salida del tubo con una fuente conocida o fuente calibrada de radiación ionizante y se ajusta la sensibilidad del tubo de ser necesario.

La extinción de los tubos Geiger-Müller puede afectar la precisión de la medición de la radiación y, por lo tanto, es necesario realizar dicha calibración periódica para asegurar la precisión de las mediciones. La extinción de los tubos Geiger-Müller se refiere a la disminución de la sensibilidad del tubo a la radiación ionizante con el tiempo.

Por lo tanto, respecto a la extinción, solo debe ser producido un único pulso a la entrada, de una única partícula ionizante, sin detonar pulsos ilegítimos, recuperándose y trasladándose al estado pasivo. Pero, como es un comportamiento y efecto físico, por un corto tiempo, de suceder, después de un impulso de descarga, el tubo se torna incapaz de detectar y no es capaz de sentir el arribo de otra partícula ionizante, siendo efectiva la pérdida de conteos suficientemente altos, limitando al tubo a una tasa menor. El punto de extinción puede entonces verse ampliado por un arreglo electrónico configurado.

Existen dos, extinciones la primera, es la extinción de tipo químico, que se refiere a la disminución de la sensibilidad de los tubos Geiger-Müller debido a la acumulación de impurezas en su interior. Con el tiempo, la radiación ionizante puede provocar la formación de compuestos químicos en el interior del tubo, lo que puede interferir con la detección de la radiación.

La extinción química puede ser especialmente problemática para los tubos Geiger-Müller que utilizan gases nobles puros, ya que estos gases son inmunes a la extinción química. Por el contrario, los tubos que utilizan gases más reactivos, como el helio y el argón, pueden ser más propensos a la extinción química. Para minimizar la extinción química, los tubos podrían ser diseñados con materiales de alta pureza o con componentes que evitan la formación de compuestos químicos. Además, la extinción química puede ser compensada mediante la realización de ese proceso de calibración periódico.

Por otro lado, se tiene la extinción externa de los tubos Geiger-Müller, la cual se refiere a la disminución de la sensibilidad del tubo debido a la presencia de materiales externos que obstaculicen la detección de la radiación ionizante. Dichos materiales pueden incluir cuerpos opacos, como metales o plásticos, o materiales que absorban la radiación, como la tierra o la piedra.

---

---

La extinción externa puede afectar la precisión de la medición de la radiación y, por lo tanto, es importante tomar medidas para minimizar su impacto. Esto puede incluir la colocación de los tubos Geiger-Müller en una posición que evite la obstrucción por materiales externos o la colocación de una malla protectora alrededor del tubo para minimizar la extinción externa. La extinción externa de los tubos Geiger-Müller se refiere a la disminución de la sensibilidad del tubo debido a la presencia de materiales externos que obstaculicen la detección de la radiación ionizante.

Por último, el enfriamiento electrónico el cual emplea electrónica de alta velocidad de control sirve para eliminar y realimentar a los electrodos con alto voltaje, cada vez que se descarga, se puede entender en el proceso de enfriamiento del tubo sin utilizar el efecto del gas, aumentando la tasa de conteo máximo. Para terminar con estos conceptos, se tiene al repliegue, el cual es una disminución de la sensibilidad de los tubos después de una exposición prolongada a niveles elevados de radiación. Esto se debe a que la radiación ionizante puede dañar los componentes del tubo, especialmente el cátodo, lo que a su vez puede reducir la capacidad del tubo para detectar la radiación.

El repliegue es un problema importante en aplicaciones de dosificación de radiación, donde los tubos Geiger-Müller están expuestos a niveles elevados de radiación durante períodos prolongados. Para minimizar el repliegue, los tubos Geiger-Müller pueden ser diseñados con materiales más resistentes a la radiación o pueden ser protegidos mediante la colocación de materiales de protección, pero no de atenuación alrededor del tubo.

El repliegue de los tubos se refiere a la disminución de la sensibilidad de los tubos después de una exposición prolongada a niveles elevados de radiación. Es un problema importante en aplicaciones de dosificación de radiación y puede ser minimizado mediante el uso de materiales resistentes a la radiación o la colocación de materiales de protección alrededor del tubo. Con ello en mente, las consecuencias de un tiempo muerto (Que es el punto inicial de la Descarga Geiger) posibilita una tasa alta de conteos de disparo continuos del tubo, momentos antes de que se dé el tiempo de recuperación. Proporciona pulsos pequeños, visibles en un osciloscopio, pero no una electrónica asociada, dando situaciones de estabilidad indeseables, ya que puede dar lecturas falsas.

La consigna de la detección es diseñar precisamente, un sistema adecuado para el tipo de tubo que se esté utilizando, como se puede notar en el gráfico de la [Figura 12] por lo que la disminución de la sensibilidad de los tubos disminuye después de una exposición extensa a niveles altos de radiación. Por eso, industrialmente, se utiliza un circuito especial llamado discriminador de salida, donde debe detectar al menos una décima parte de la magnitud pulsar normal para lograr una protección ante esto. Dicho circuito, debería poder “Discriminar” cuando se producen pulsos acumulados, cuando el voltaje del ánodo fue desplazado en el evento Geiger a otro nivel de energía por dicha acumulación de impulsos, ruido y descargas secundarias. En esta tesis, se planteará la capacidad de detección en esta situación, donde se pueda conocer si el umbral predeterminado del SBM-20 ha sido excedido.

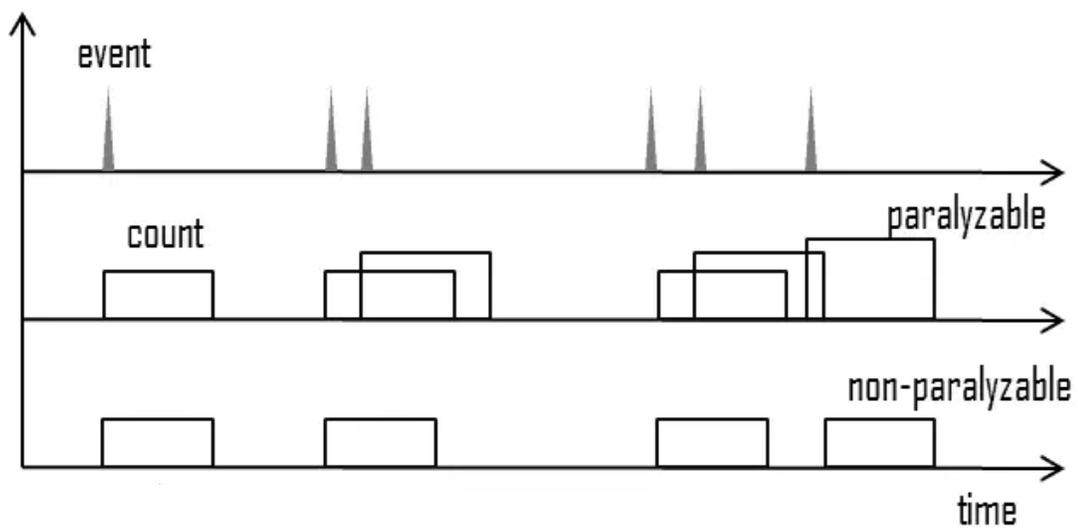
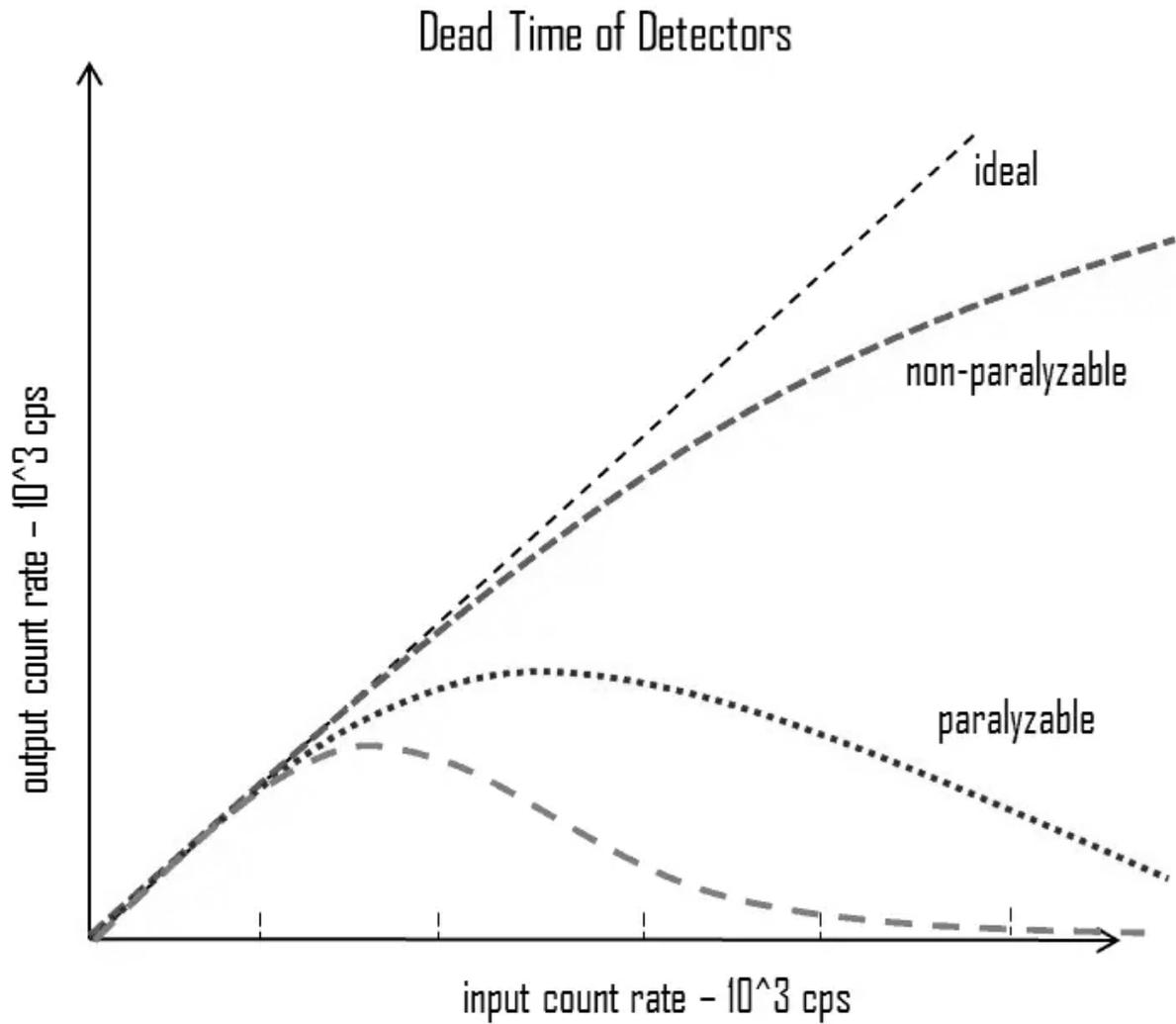


Figura 12 Tiempo muerto Geiger (2019) Radiation-dosimetry. Disponible: <https://www.radiation-dosimetry.org/what-is-quenching-dead-time-geiger-counters-definition/>.

---

---

### 1.6.6 Fases de Detección

Continuando con los tubos Geiger-Müller de forma general, todos ellos funcionan por pequeños pasos, como bien se señaló en la sección de Descarga Geiger, las fases de detección de los tubos incluyen la ionización del gas, la aceleración de los electrones libres hacia el cátodo, la descarga eléctrica que se produce y la amplificación del pulso eléctrico resultante mediante un circuito externo. Con esto en mente, se puede tener más claridad en la parte de las fases, que todas son parte de etapas físicas que llevan energía de diferentes manifestaciones, estas fases son:

- 1.- **Ionización:** Cuando la radiación ionizante entra en el tubo, ioniza el gas en el interior, creando iones positivos y electrones libres.
- 2.- **Aceleración:** Dichos electrones libres son acelerados hacia el cátodo por el campo eléctrico presente en el tubo acelerados en la cámara interna.
- 3.- **Descarga:** Cuando los electrones llegan al cátodo, se produce una descarga eléctrica a través del gas ionizado, generando un pulso eléctrico.
- 4.- **Amplificación:** Este pulso eléctrico es amplificado mediante un circuito externo para producir una señal que pueda ser medida y utilizada para indicar la detección de la radiación ionizante.
- 5.- **Eficiencia de detección:** Depende de varios factores, como el tipo de gas empleado, la presión, el voltaje suministrado, la forma, material y tamaño del tubo. Es importante para determinar la sensibilidad del tubo a diferentes tipos de radiación.
- 6.- **Tasa de conteo:** Se refiere a la cantidad de pulsos eléctricos producidos por unidad de tiempo. Es una medida de la intensidad de la radiación ionizante que puede ser producida de forma eficiente y sin atenuaciones por el tubo.
- 7.- **Umbral de detección:** Es la cantidad mínima de energía que se requiere para producir un pulso eléctrico en el tubo. El umbral de detección es importante para determinar la sensibilidad del tubo a diferentes tipos de radiación, varía dependiendo el grosor de las paredes tubulares y del material principalmente, sin embargo, de nuevo, el gas empleado es fundamental para conocer el umbral.
- 8.- **Límite de conteo:** Es la tasa máxima de cuentas que puede ser registrada por un tubo Geiger-Müller. El límite de conteo es importante para evitar sobrecargas en el sistema de medición y para asegurar la fiabilidad de los datos obtenidos.

La Eficiencia de conteo, cómo tal, no es una especificación canónica de las fases, pero si es importante porque sin ella, no pueden alcanzarse los puntos 7 y 8. En la tesis, se emplean las fases de detección para la electrónica asociada, ya que es de suma importancia conocerlas porque se ha de diseñar el sistema, de forma compacta, precisa y fiable con una tarjeta de desarrollo o en Protoboard, así que entender estas fases, resulta una guía tanto para el propio diseño electrónico, como para la detección de los pulsos y la amplificación física de ellos.

---

---

### 1.6.7 Condiciones de Diseño

Llegando a esta parte, se abordarán las partes más importantes para lograr, con todo lo anteriormente mencionado, un monitor de detección de radiación nuclear empleando un tubo Geiger-Müller. Es de suma importancia, porque se mencionarán todas y cada una de las consignas en el ámbito físico para poder hacerlo. Y estas son las condiciones:

- 1.- **Fuente de alimentación:** El tubo Geiger-Müller requiere una fuente de alimentación de alto voltaje para crear el campo eléctrico necesario para acelerar los electrones libres hacia el cátodo. La fuente de alimentación debe suministrar una tensión constante y estable, típicamente en el rango de 120 a 600 voltios, por supuesto, dependiendo de cada tubo Geiger-Müller utilizado, esta parte de la fuente de alimentación es vital, porque debe ser bien diseñada tanto por elementos activos, pasivos o por CI ya que, con esto, va a depender si el diseño final es verdaderamente compacto o no, que es precisamente en el caso de esta tesis que si lo sea.
- 2.- **Resistencia de carga:** La resistencia de carga es la resistencia del circuito externo que se conecta al ánodo del tubo Geiger-Müller. La resistencia de carga se selecciona para proporcionar la carga necesaria al tubo para producir un pulso eléctrico medible. La resistencia de carga típica está en el rango de 5 a  $10M\Omega$ .
- 3.- **Capacitador de acoplamiento:** Se utiliza para bloquear el voltaje de CC de la fuente de alimentación y permitir que sólo los pulsos CA se transmitan al amplificador. El valor del condensador de acoplamiento debe seleccionarse de forma adecuada para evitar la atenuación de la señal.
- 4.- **Amplificación:** La señal eléctrica producida por el tubo Geiger-Müller es generalmente muy débil y requiere amplificación para poder ser registrada y analizada. Un amplificador adecuado debe ser seleccionado para proporcionar la ganancia necesaria y minimizar el ruido. Dicho circuito amplificador, es construido en función del diseño general, el amplificador debe tener los componentes necesarios y siempre en función del tipo de electrónica utilizada, es decir, si se va a generar un monitor con componentes SMD, debe tener ciertas características como espaciamiento, por si se ha de montar en una placa PCB. La amplificación es crucial, porque de allí, pasaría a un dispositivo capaz de dar seguimiento a cada pulso obtenido.
- 5.- **Discriminador:** Se utiliza para rechazar los pulsos eléctricos producidos por el ruido de fondo y sólo aceptar los pulsos producidos por la radiación ionizante. El nivel de discriminación debe ajustarse para asegurar que todos los pulsos producidos por la radiación sean detectados, mientras se reduce al mínimo la detección de ruido de fondo.
- 6.- **Circuitería Electrónica asociada de Detección:** Simplemente, se refiere a aquellos componentes que reportarán al operador, los pulsos de forma visible (Como un diodo LED) o de forma auditiva (Una bocina o Buzzer) para conocer en el campo, que si estan ocurriendo eventos de detección.

---

---

### 1.6.8 Eficiencia de Detección

Este es el punto culminante sobre los tubos Geiger-Müller, aquí el concepto se refiere a la proporción de partículas ionizantes que son detectadas por el tubo con relación a la cantidad total de partículas ionizantes que están presentes en la muestra que se está analizando. Es una medida de la capacidad del tubo para detectar radiación ionizante en pocas palabras.

La eficiencia de detección está influenciada por varios factores, como ya se ha mencionado, entre ellos el tipo de partículas ionizantes que se están detectando, la energía de las partículas, la geometría del tubo, el material del tubo, el tipo de gas utilizado en el tubo y el voltaje de operación del tubo. Se expresa típicamente como un porcentaje y se calcula dividiendo el número de partículas ionizantes detectadas por el tubo por el número total de partículas ionizantes presentes en la muestra.

Es importante tener en cuenta que la eficiencia de detección del tubo Geiger-Müller no es constante en todo el rango de energía de las partículas que se están detectando. La eficiencia de detección disminuye a medida que la energía de las partículas aumenta, lo que se debe en gran parte a la absorción de la radiación por el material del tubo y el gas en su interior. En ese caso, es importante elegir el tipo de tubo Geiger-Müller adecuado y configurar el voltaje de operación del tubo para maximizar la eficiencia de detección en la energía de las partículas que se están midiendo.

Este concepto, se aplica de forma general a cada tubo, como al que se tiene planteado utilizar en este trabajo, ya que el que se tiene en mente, cumple con ser delgado de paredes no gruesas, con buen porcentaje de eficiencia en energía  $\beta$  y  $\gamma$ , pero el cátodo es construido por acero inoxidable y el cuerpo tubular tiene 0.05mm de grosor, por lo que no es apto para captar energía  $\alpha$  por ejemplo, así que si se colocase una muestra que de antemano se supiera que es  $\alpha$  no habría detección y se podría pensar que no está funcionando, por lo que entraría en conflicto esa parte de una posible saturación con un fallo de detección o alguna cuestión de esa índole.

Las partículas  $\alpha$  al poseer menor alcance máximo de menos de 50mm también representaría un problema, ya que se debería acercarse mucho el monitor para poder sentir esta energía, además teniendo en cuenta la parte de la atenuación propia del aire, se debería configurar la ventana para bajas densidades, de  $1.399 \rightarrow 2 \frac{mg}{cm^2}$  para que entre en un rango aceptable de eficiencia.

Por último, se debe tener en cuenta, a nivel laboratorio y de campo, que tipos de partículas se esperarían encontrar, esto en entornos controlados o semi estables, porque cada posible partícula tendría energía diferente. En algunos modelos de tubos Geiger-Müller, el conteo radiactivo fotónico en energías ( $X$ ,  $\gamma$ ) arriba de  $25k eV$  (Electrón-Volt) dependería de la interacción de la radiación en el cuerpo tubular, aumentando el número atómico del material con que esté fabricada la pared.

---

---

### 1.6.9 Tubo Geiger-Müller SBM-20 Soviético $\beta$ .

Este tubo, es el planteado para ser utilizado en este proyecto, es objetivo de esta sección, señalar por qué este particular modelo será utilizado, las características de este tubo consideradas en la [Tabla 1], las ventajas y desventajas, las consideraciones de diseño, sus orígenes y lo que estos implican y cómo puede apoyar a realizar el objetivo principal.

Bien, para comenzar, este tubo particular luce como en la [Figura 13], tiene todas las características que se abordaron anteriormente, todas ellas, con números concisos, con ciertos rangos, con parámetros de operación, y es importante mencionar todo ello en este formato, puesto que la hoja de datos técnicos se encuentra tanto en ruso como en inglés, ese será el primer punto de partida, el origen del tubo. Fue desarrollado en la Unión Soviética en la década de 1950, fabricado en grandes cantidades para su uso en una variedad de aplicaciones relacionadas con la detección de radiación.

El diseño del tubo SBM-20 se basa en la tecnología de detección de radiación de gas Geiger-Müller, que fue inventada por Hans Geiger y Walther Müller en 1928. El principio detrás de esta tecnología es que las partículas ionizantes que pasan a través de un gas crean una serie de electrones secundarios que son amplificados por una carga eléctrica aplicada al gas. Dicho efecto produce una descarga eléctrica que se puede detectar y medir, como bien se ha mencionado.

El tubo SBM-20 utiliza una mezcla de gases llamada "mezcla de argón-isobutano" que es especialmente sensible a partículas beta y gamma, lo que lo hace útil en una variedad de aplicaciones de detección de radiación. Además, el tubo es compacto y fácil de usar, lo que lo ha convertido en uno de los detectores de radiación más populares del mundo.

El éxito del tubo SBM-20 y su popularidad en todo el mundo llevó a la producción de otros modelos similares de tubos Geiger-Müller, lo que permitió una mayor expansión en el campo de la detección de radiación y la seguridad nuclear. Hoy en día, el tubo SBM-20 sigue siendo uno de los tubos Geiger-Müller más comunes y ampliamente utilizados en la detección de radiación y la medición de dosis. Después de la caída de la URSS muchos de ellos fueron almacenados en contenedores por muchos años, décadas incluso, puesto que se planteaba que fuese utilizado inclusive por poblaciones civiles si una guerra nuclear durante la guerra fría se daba lugar.

Es en esencia un tipo de detector de radiación de gas que utiliza la tecnología Geiger para detectar partículas ionizantes. El tubo SBM-20 fue diseñado para detectar partículas  $\beta$  y rayos  $\gamma$ , debido a que tiene una construcción específica y su sensibilidad aumenta con la energía de las partículas que se están detectando. Tiene un diámetro de 10 mm y una longitud de 80mm.

Tiene una tensión de operación típica de 400-500 voltios, y puede ser utilizado en aplicaciones que requieren monitoreo de radiación ambiental, detección de fugas de radiación en equipos médicos, verificación de materiales radiactivos, y otros campos relacionados con la detección de radiación.

Cabe destacar que, aunque el tubo SBM-20 es ampliamente utilizado y es considerado un tubo Geiger-Müller estándar, su rendimiento y características específicas pueden variar según el fabricante y el lote de producción, por lo que es importante verificar las especificaciones del tubo utilizado para cada aplicación.

El SBM-20 tiene las siguientes características técnicas:

Parámetros y Especificaciones Generales	Valores SBM-20 Soviético $\mathcal{A}$
Gas utilizado:	$Ne + Br^{2} + Ar$
Material del cátodo:	Acero Inoxidable
Longitud máxima (mm):	108 mm
Longitud efectiva (mm):	91 mm
Diámetro máximo (mm):	11 mm
Diámetro efectivo (mm):	10 mm
Tipo de Conector	PIN Fusible
Rango de Temperatura Operativa (°C):	-60° a +70°
Temperatura durante más de 125 Horas:	+85 °C

Especificaciones de las Paredes	Valores SBM-20 Soviético $\mathcal{A}$
Densidad de área ( $\frac{mg}{cm^2}$ ):	40 ( $\frac{mg}{cm^2}$ )
Grosor de Paredes (mm):	0.05 mm

Parámetros y Especificaciones Eléctricas	Valores SBM-20 Soviético $\mathcal{A}$
Resistencia mínima del ánodo:	1 $M\Omega$
Resistencia recomendada para ánodo:	5.1 $M\Omega$
Voltaje operativo recomendado:	400 $V$
Rango de voltaje operativo:	350 – 475 $V$
Voltaje inicial:	260 – 320 $V$
Longitud del voltaje de Meseta Geiger:	Al menos 100 $V$
Corriente máxima permitida:	20 $\mu A$
Pendiente máxima de la meseta (%/100 voltios)	10 %
Tiempo muerto mínimo en <b>Umbral = 400V</b> :	190 $\mu s$
Amplitud del pulso:	No menos de 50 $V$
Rango de trabajo:	0.004 – 400 $\frac{mKR}{s}$
Rango de trabajo:	0.0014 – 144 $\frac{mR}{h}$
Sensibilidad Gamma ( $\gamma Ra^{266}$ ):	29 $\frac{cps}{mR} /hr$
Sensibilidad Gamma ( $\gamma Co^{60}$ ):	22 $\frac{cps}{mR} /hr$
Contra fondo inherente:	1 $cps$ no más de 1 Impulso
Capacitancia del Tubo:	4.2 $pF$
Expectativa de Vida:	Al menos hasta 20G ( $2 \cdot 10^{10}$ ) <i>pulsos</i>
Peso:	10 / 9 <i>gramos</i>
Sensibilidad del Contador a lo largo del funcionamiento en corriente y pulsos:	20 % Sensibilidad de Cambio

Tabla 1 Hoja de Datos Técnicos del SBM-20 Sintetizada.

---

---

Los tubos SBM-20 tienen un certificado de aceptación en términos de calidad con requisitos técnicos de la OTU.339.027 para explotación. Cada tubo fue almacenado, donde se mantuvieron en calefacción constante, y el embalaje de almacenamiento a una temperatura de 5 a 35°C con humedad relativa a 80%. La razón principal para utilizarlo en este proyecto es debido a su actual disponibilidad en la tienda Amazon, su bajo costo y su facilidad de conseguirlo, además de su legalidad. La desventaja mayor que representa es que al ser soviético, no puede repararse “Con el fabricante” si hay algún detalle y que la hoja de datos técnicos original se encuentra escrita a máquina y en ruso.

Las obligaciones garantizadas por el fabricante soviético son:

- Cumplimiento de los contadores y estándares SBA Soviéticos, durante el periodo de conservación CLI dentro del plazo de conservación.
- Los Tubos soviéticos cuentan con parámetros de almacenamiento y operabilidad, si no se cumplen, se podrían reparar o rellenar según sea el caso.



Figura 13 SBM-20 (2022) Amazon. Available at: <https://www.amazon.com.mx/MightyOhm-SBM-20-Geiger-Muller-Tubo/dp/B08MJ2Z3H3>.

## 1.7 Cámara de Ionización

En esta sección es importante señalar los dispositivos que tienen interrelación con los detectores de radiación que utilizan tubos Geiger-Müller, ello para poder diferenciarlos, de los posibles dispositivos que tengan características similares al dispositivo final de este trabajo. Son utilizados para la detección de partículas aéreas del tipo Humo y Radiación Ionizante. Básicamente, es un instrumento de ionización concebido para medir el número iónico dentro de un contenedor lleno de gas en placas conductoras, o electrodos geoméricamente diseñados para contención, con separaciones.

Primero se aplica un voltaje entre las placas conductoras, lo que ayuda a calibrar y “limpiar” los electrones sin que el dispositivo general alcance una saturación. En el momento que el gas entre los electrodos es ionizado, ya sea por decaimiento radiactivo o Rayos X, dichos iones son trasladados a los electrodos opuestos, creando una corriente de ionización, pero con la particularidad que solo puede ser medida por un electrómetro o un galvanómetro. Se emplean en la industria nuclear, proporcionando un cálculo de valor proporcional a la dosis recibida, con vida útil mucho mayor a los Tubos Geiger-Müller en promedio. Estas cámaras, son utilizadas por ejemplo en dispositivos utilizados en radioterapia y física médica para medir la dosis de radiación en pacientes y en equipos médicos.

Básicamente están compuestas por una cámara de gas con electrodos, que están conectados a un circuito electrónico que mide la carga eléctrica producida por los iones generados en el gas por la radiación. Cuando los iones son creados por la radiación, se mueven hacia los electrodos y generan una corriente eléctrica que se mide y se registra. Son muy precisas en la medición de la dosis de radiación y apoyan en la monitorización de la exposición a la radiación en entornos de trabajo.

---

---

Por otro lado, se tienen a las cámaras de ionización de detención de humo, básicamente, detectores de humo, que funcionan mediante el uso de un sensor que detecta partículas de humo ambientales. Puede estar fabricado de diferentes materiales, como fotocélulas, ionización o combinación de ambas. Cuando las partículas de humo se perciben, el detector activa una alarma sonora y/o visual para alertar a las personas sobre la posible presencia de un incendio. La mayoría de los detectores de humo funcionan con baterías y pueden ser instalados fácilmente en el techo o en la pared. También hay detectores de humo conectados a la red eléctrica, que tienen una batería de respaldo en caso de interrupción de la electricidad.

Deben ser probados regularmente para asegurarse de que funcionen correctamente. Además, deben ser reemplazados cada cierto tiempo según las recomendaciones del fabricante para garantizar su correcto funcionamiento. La cámara contiene una pequeña cantidad de Americio-241, siendo un emisor alfa, transportando una cantidad considerable de energía, pero cuando ocurren colisiones en la cámara de ionización por sus gases, ( $N + O$ ) podría ionizar las moléculas sin carga, algunas serán acreedoras para perder electrones y posteriormente se volverán a cargar. Cada placa tiene diferente voltaje, dependiendo el fabricante, donde los iones y electrones son atraídos, creando un flujo iónico entre placas, dicho flujo es medible, cuando el humo entra en la cámara de detección, la corriente de flujo es interrumpida, causando que los iones golpeen las partículas del humo neutralizándolos, donde cada caída se traduce en la señal de alarma.



Figura 14 Detector de Humo Operando (2023) OpenAi.com. Disponible en: <https://labs.openai.com/>

### 1.8 Detector Proporcional

Este es un dispositivo interesante, se trata de un tipo de detector de radiación utilizado para medir la cantidad de partículas ionizantes, como los rayos X o los rayos gamma, que atraviesan un material. Este detector consta de un gas que se encuentra en un tubo lleno de alambre, que se encuentra en un campo eléctrico. Cuando las partículas ionizantes entran en el tubo, ionizan el gas y liberan electrones que se mueven hacia los alambres cargados. A medida que los electrones se aceleran, chocan con los átomos del gas y producen más electrones, lo que se conoce como una cascada de ionización.

---

---

La cantidad de electrones que se generan en la cascada es proporcional a la cantidad de partículas ionizantes que han entrado en el tubo, lo que permite medir la intensidad de la radiación. Este tipo de detector tiene una alta eficiencia y una buena resolución energética, lo que lo hace útil para la detección de radiación en la industria nuclear. Sin embargo, al igual que los tubos Geiger-Müller requiere un alto voltaje para funcionar y puede ser sensible a las variaciones en la temperatura y la presión del gas. Además de la cascada de ionización, existe un tipo de detector proporcional, son los detectores proporcionales de gas, donde el gas ionizado actúa como medio de amplificación y los electrones se aceleran a través del gas para producir una señal de detección. Estos detectores son más comunes y se utilizan para detectar partículas  $\alpha$ ,  $\beta$ , rayos  $\gamma$  & Rayos X.

Por otro lado, es importante señalar que no existen detectores proporcionales de estado sólido, los detectores semiconductores son de otro tipo y dependen de la radiación que se vaya a detectar. Hay detectores de barrera superficial, que sirven para detectar partículas Alfa y Beta, de Yoduro de Sodio o de Germanio Hiperpuro, que sirven para detectar Rayos X o Rayos Gamma, o bien el diodo PIN que sirve para lo mismo. En cualquiera de todos los casos, funcionan como un diodo polarizado en inversa y el ensanchamiento de la región de agotamiento sirve como volumen sensible del detector.

Los detectores proporcionales también pueden ser utilizados en la técnica de espectrometría de rayos X, en la que se mide la energía de los rayos X emitidos en una muestra para determinar su composición química. En este caso, se utiliza un detector proporcional para medir la energía de los rayos X que interactúan con la muestra y producen una cascada de ionización en el detector.

Para terminar, el contador proporcional, detecta partículas ionizantes, que consiste en un contenedor metálico relleno de algún gas noble, generalmente (*Ar ó Xe*) requiriendo aproximadamente de 250 a 750 V para operar en una región proporcional, donde el campo eléctrico fluye con regularidad sobre el gas.

Podría generarse cierta confusión entre este dispositivo y el que se plantea construir, y los Monitores de Radiación Geiger-Müller y es que, aunque los detectores proporcionales y los Monitores Geiger son ambos tipos de detectores de radiación, difieren en su diseño y funcionamiento. Es decir la cámara de ionización, el contador proporcional y el Monitor de Radiación Geiger-Müller son detectores gaseosos.

Un contador Geiger es un detector de radiación que se basa en la ionización que se produce cuando las partículas ionizantes entran en un gas a baja presión, como el gas argón. Consta de ese tubo lleno de gas y un electrodo de carga positiva en el centro del tubo, rodeado por un electrodo cilíndrico de metal. Cuando una partícula ionizante entra en el tubo, ioniza el gas y produce una avalancha de electrones que se aceleran hacia el electrodo central. Esto produce un pulso eléctrico que se puede medir y contar para determinar la cantidad de partículas ionizantes que han entrado en el tubo.

La principal diferencia entre un contador Geiger y un detector proporcional es que el contador Geiger no proporciona información sobre la energía de las partículas ionizantes que detecta. En cambio, el contador Geiger simplemente cuenta el número de partículas ionizantes que han entrado en el tubo. Debido a esto, el contador Geiger no es adecuado para mediciones precisas de la energía de las partículas ionizantes o para la identificación de diferentes tipos de partículas.

---

---

Por otro lado, un detector proporcional se basa en la amplificación de la señal producida por la ionización que ocurre en el gas o en el material semiconductor. Debido a esta amplificación, un detector proporcional puede proporcionar información sobre la energía de las partículas ionizantes y puede ser utilizado para la identificación de diferentes tipos de partículas.

### **1.9 Contador Geiger-Müller, Sistema y Monitor**

Con todo ello en mente, y ya definidos todos los puntos conceptuales, se abarca el último punto, donde se define, que tipo de dispositivo se ha de implementar, que es el contador Geiger-Müller. Quizá suene repetitivo, pero es importante señalar cada característica para nombrar y definir al proyecto como se debe. Es conocido por ser un tipo de detector de radiación empleado para conseguir detectar la cantidad de partículas ionizantes, como los rayos X, rayos  $\gamma$  partículas  $\alpha$ ,  $\beta$ . Consta de un tubo lleno de gas a baja presión, y dos electrodos: un alambre central positivamente cargado y un cilindro exterior negativamente cargado. El tubo está sellado herméticamente y está lleno de un gas que se ioniza cuando una partícula ionizante entra en el tubo básicamente.

En el momento que una partícula ionizante entra en el tubo, ioniza el gas y produce una avalancha de electrones que se mueven hacia el alambre central. Esta avalancha de electrones produce un pulso eléctrico que se puede medir y contar para determinar la cantidad de partículas ionizantes que han entrado en el tubo. El detector Geiger-Müller es un tipo de detector gaseoso, y la diferencia con otros detectores de gas es que tiene una tensión de trabajo superior, lo que permite una gran amplificación de la señal.

La principal ventaja del detector Geiger-Müller es que es muy sensible y fácil de usar, sin embargo, el contador Geiger-Müller no proporciona información sobre la energía de las partículas ionizantes que detecta, por lo que no es adecuado para mediciones precisas de la energía de las partículas ionizantes o para la identificación de diferentes tipos de partículas. Comúnmente es empleado para la monitorización ambiental de la radiación, la detección de fugas en la industria nuclear.

Por último, la principal característica del Contador Geiger-Müller es que implementa una electrónica asociada para poder percibir cada una de las lecturas al operador, es decir, cada pulso detectado, se reportará con el uso de algún aditamento electrónico, como mencionaba, diodos LED, Buzzer y en este caso para el proyecto, una forma digital de contabilización, ya que no es factible emplear solo flashazos LED o sonidos Buzzer constantes si no se sabe cuántos han sucedido respecto una cantidad de tiempo.

De allí su nombre, entonces, un contador Geiger-Müller es aquel dispositivo con todo lo absolutamente necesario para que un operador pueda sentir la cantidad de radiación ambiental circundante, con el apoyo de un tubo Geiger-Müller, propiamente energizado, que estará facultado para reportar esos hallazgos al ser humano y que le resulten fáciles de leer e interpretar, que es básicamente lo que se mencionaba al inicio de esta tesis; ¿Cómo poder ver esa “niebla invisible”?

La parte de la radiación se reduce a que tipos de energía es capaz de medir, en el caso particular con el tubo SBM-20, solo podrá detectarse la llamada  $\beta$  &  $\gamma$ . Hablando del monitor, es entonces la culminación de todas aquellas tecnologías capaces de traducir al operador lo que ocurre en tiempo real, y con el uso de tecnología moderna, lograr la monitorización vía inalámbrica, precisamente cuidando la integridad y seguridad. Todo eso último compete al siguiente capítulo.



## Capítulo II

### **2.1 Plan general de diseño circuital [SBM-20] (Electrónica Asociada).**

En este capítulo finalmente se llega al ápice del proyecto, que es el reporte de la construcción del monitor. Haciendo el recuento con toda la información anterior, se implementará un Monitor de Radiación Nuclear con un detector Geiger-Müller, con eso en claro, procedemos a mostrar el plan general de desarrollo circuital.

Primero, se ha de diseñar el circuito con una fuente de alto voltaje, dentro del sistema, es decir, dentro del circuito, sin necesidad de acudir por ejemplo a fuentes estacionarias, fuentes montadas, elevadores de voltaje externos, nada de eso. El plan para cumplir con el objetivo de hacerlo portátil y sumamente cómodo además de seguro requiere de una manera electrónica de poder alimentar al SBM-20 con el voltaje que necesita, pero teniendo en cuenta eso anterior.

Segundo, debe poseer el amplificador de señal, igualmente dentro del circuito, y debe de actuar de manera simultánea y fluida con la fuente de alto voltaje, además del tubo SBM-20. Se debe de colocar el amplificador considerando el espacio entre sus componentes.

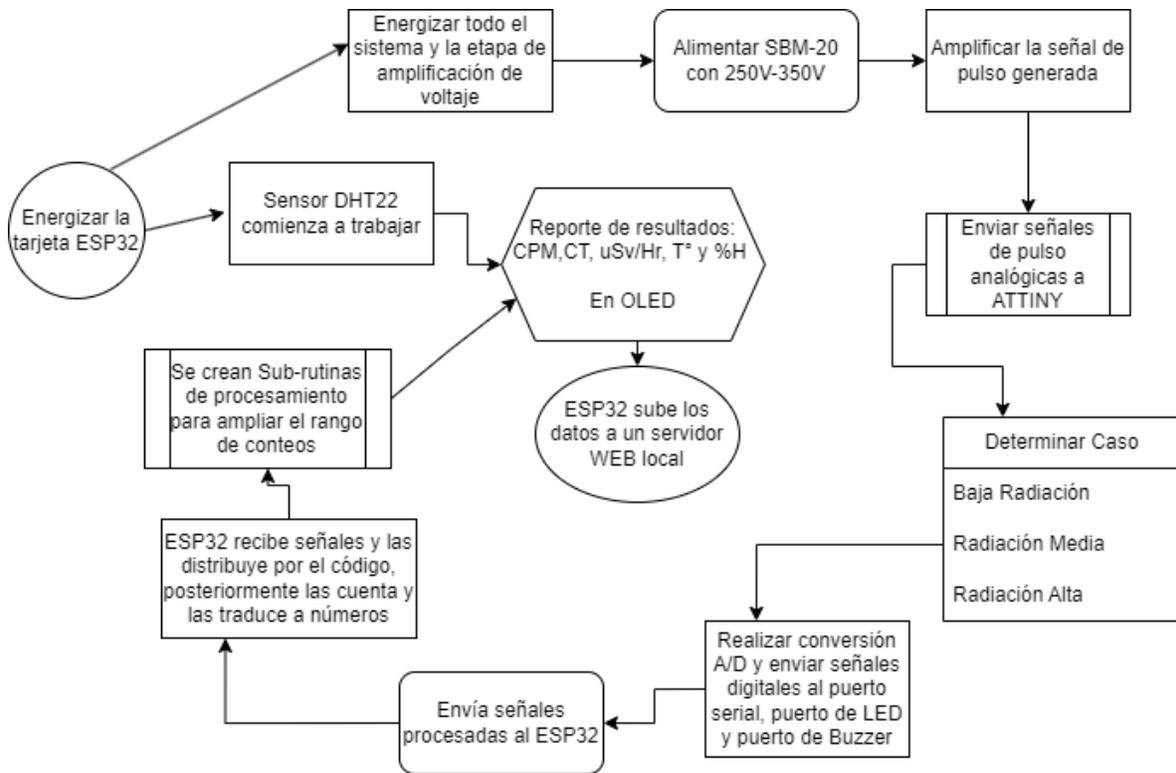
Tercero, se debe de trasladar esa señal a otra electrónica asociada, que sea capaz de interpretar los eventos ocurridos, es decir, una forma en la cual, cada pulso ya amplificado, sea contabilizado de una manera, y que a la par, pueda crear esa sinergia ingenieril que se está buscando, ósea, el reporte al usuario en términos que pueda leer, percibir y ver. Además de que debe tener una especie de estación de control para poder expandir todos los pulsos a dispositivos capaces incluso de graficar las señales.

Cuarto, el diseño debe poseer un cerebro general, una manera de controlar todo lo anterior, además de una fuente de voltaje de pequeña señal, que sea propia. Puede ser un microcontrolador de gran escala, o una tarjeta de desarrollo. Este cerebro será capaz de aumentar el proyecto y tornarlo algo más allá de lo actualmente convencional.

Quinto, debe de poseer el diseño, un sensor adicional, concretamente, un sensor de temperatura y humedad; ¿Por qué? Se analizará en su momento a detalle, pero en general, si se ha de trabajar en el campo, algunas veces, las plantas de energía nuclear, muestras, fugas etc. Tienen estas características, lo que ayudaría al operador a discernir que está ocurriendo a su alrededor.

Sexto, serían características adicionales para complementar el proyecto, la primera, el uso de una pantalla OLED de 12X64 en lugar de un LCD de 16X2, precisamente para darle más peso a las lecturas y sin preocuparse por el espacio. Además, adicional y opcionalmente, el uso de un encoder rotatorio para poderse desplazar en los diferentes menús que se pudiesen crear, y, por último, un teclado matricial de 4x4 para ingresar datos, como quizá, por ejemplo: “A los cuantos minutos, se ha de congelar el Display”, “A los cuantos CPM se ha de detener el conteo”, cosas de ese estilo.

A continuación, se incluye un diagrama general de la solución, donde se muestra paso a paso cómo resolver el problema de la captación de variables radiactivas ionizantes.



### 2.1.1 El Diseño original de Jeff Keyzer [Hardware Libre].

El Estadounidense Jeff Keyzer en su página *Geiger Counter* (2022) MightyOhm. Disponible: <https://mightyohm.com/blog/products/geiger-counter/> (Acceso: 25 agosto 2022). Muestra como utiliza un microcontrolador ATTINY2313, para lograr identificar todos los eventos Geiger que ocurren con el tubo de mayor disponibilidad actual, el SBM-20, en su página expresa directamente, que el uso de su código es 100% libre para proyectos de este estilo. Además, que ha realizado algunos cálculos útiles para la construcción de una fuente de alto voltaje pequeña, utilizando componentes discretos, activos, pasivos y CI, igualmente de Hardware 100% libre.

Su diseño, es tomado en este proyecto, para la parte de la electrónica asociada, ya que cumple de entrada con algunas condiciones del plan general de diseño circuital, exclusiva y puntualmente con el SBM-20. Es decir, mucha historia sucedió a esta persona probando valores en la resistencia de carga del tubo, de la fuente y de amplificadores.

El diseño de Keyzer es pequeño, puntual, con el uso de baterías alcalinas, y el uso de puertos de comunicación seriales adicionales, por lo que mucho de ello, no es de utilidad para nuestro particular objetivo, entonces; ¿Qué se rescata de Jeff Keyzer?

- En primer lugar, los componentes totales para concebir un diseño compacto.
- Luego, el código libre para el sub-cerebro (ATTINY2313-A) empleado para la detección de los eventos Geiger y su comunicación de microcontrolador.

- 
- 
- Posteriormente, la configuración de valores de componentes para conseguir la operación en los tubos SBM-20 (Jeff Keyzer es uno de quienes actualmente los distribuyen en EE.UU).

Por otro lado; ¿Qué no se tomaría de Jeff Keyzer?

- Los componentes canónicos que utilizó y los modelos específicos.
- El diseño PCB de su producto en venta.
- El diseño de la armadura para el detector Geiger-Müller.
- Los puertos seriales adicionales.
- El diseño electrónico del Switch de alimentación y el circuito de alimentación por baterías alcalinas.

Jeff Keyzer, lanzó este diseño al mundo en 2011, inicialmente en EE. UU. con algunas campañas en convenciones de tecnología, mencionando que fue recabando su diseño de diferentes blogs también. Esta idea que tuvo fue con intención de que se crearan diferentes paquetes para poder vender. Es decir, en su página se puede comprar un monitor armado al 100% con carátula, un monitor por partes sin soldar o solo el PCB, siempre con intención, como lo cuenta en su página y en diferentes entradas de su blog, para fines educativos.

Hace mención en sus créditos finales, que muchas cosas como la Fuente de Alto Voltaje compacta, es resultado del aporte de "*BroHogan's*" y que el Sesgo y demás cálculos posibles, le fueron inspirados por Tom Napier en 2004.

### **2.1.2 Modificaciones del diseño de Mighty Ohm de Jeff Keyzer.**

El proyecto por presentar es posible gracias a diferentes personas, muchas de ellas que hicieron diferentes aportes a blogs científicos, de electrónica aficionada, de investigación. Jeff Keyzer juntó todo lo libre, y realizó la compilación en su blog, disponible para todos.

Las modificaciones para realizar en este trabajo son las siguientes:

- La sustitución de componentes que no existen en la actualidad.
- La determinación de componentes según su disponibilidad y funcionalidad.
- La expansión sensorial y tecnológica del diseño de Mighty Ohm.
- Compactar los diseños en uno solo creando un sistema que obedezca al objetivo de ser portátil.
- Diseñar un código en un "Super Cerebro" capaz de reportar las lecturas a un medio interpretable para el operador en todo sentido, Visual y Auditivo en un Display, además de implementar una tarjeta de desarrollo pequeña capaz de acceder a un nivel tecnológico mayor, que logre el objetivo de poder sintetizar el circuito final.

- 
- 
- Diseñar el proyecto con la guía y enseñanza de personas especialistas en temas de física nuclear y de ingeniería eléctrica-electrónica para conocer qué debe tener un buen monitor de radiación, conforme a lo que solicita la industria y el campo de investigación.

### 2.1.3 El Acoplamiento con ESP32 y generación de código.

Este objetivo de lograr un diseño superior al diseño base, tiene como meta, el uso de tecnología inalámbrica, por lo tanto, qué mejor que hacer algo referente a ello. Por lo que hoy en día la tarjeta ESP32 de desarrollo es ampliamente utilizada por diferentes razones, muchas de ellas son en comparación con Arduino UNO y Arduino MEGA, como el espacio necesario entre ellas, la capacidad del ESP32 de albergar Wifi y Bluetooth por decir algunas. Anteriormente, al iniciar el presente proyecto, y realizar algunas pruebas, muchas de ellas, fueron concebidas con una tarjeta de desarrollo Arduino UNO original, donde fue posible discernir el uso de tecnología de la empresa Arduino con tecnología de ESPRESSIF (ESP32), así que, al momento de presentar este proyecto, se muestra la evolución final, pero volviendo al acoplamiento ESP32 como el mostrado en la [Figura 15], las principales razones del uso de esta tecnología son las siguientes:

- 1.- ESP32 Tiene muchas variedades y versiones de sus tarjetas.
- 2.- Utiliza el mismo entorno de codificación (IDE) igual que Arduino.
- 3.- Tiene la posibilidad de aumentar sus capacidades tanto de procesamiento, como de *Watch Dog Timer*. Ya que garantizar la confiabilidad y la estabilidad del sistema. Proporcionando una protección adicional contra fallas del software y eventos inesperados, ayudando a mantener el sistema en funcionamiento de manera segura.
- 4.- **Conectividad Wifi y Bluetooth:** El ESP32 viene con conectividad inalámbrica Wifi y Bluetooth incorporada, lo que significa que no necesita módulos externos para conectarse a redes Wifi o dispositivos Bluetooth.
- 5.- **Velocidad de procesamiento:** El ESP32 tiene un procesador más rápido que el Arduino UNO, lo que lo hace más adecuado para aplicaciones que requieren un procesamiento intensivo.
- 6.- **Mayor cantidad de pines GPIO:** El ESP32 tiene más pines GPIO que el Arduino UNO, lo que significa que puede conectarse a más dispositivos externos.
- 7.- **Capacidad de procesamiento de señales analógicas y digitales:** El ESP32 tiene un convertidor analógico a digital (ADC) de mayor resolución que el Arduino UNO, lo que permite la captura de señales analógicas con mayor precisión. También tiene una capacidad de procesamiento de señales digitales (DSP) incorporada, lo que permite el procesamiento de señales en tiempo real.
- 8.- **Capacidad de procesamiento de múltiples tareas:** El ESP32 es capaz de realizar múltiples tareas simultáneamente, lo que lo hace más adecuado para aplicaciones en las que se requiere el procesamiento de múltiples flujos de datos.

---

---

9.- **Tamaño reducido:** En contraste con Arduino UNO, es más pequeño en longitud y anchura, lo que permitiría empotrarlo directamente en un PCB.

10.- **Energía:** El ESP32 cuenta con un PIN de salida de voltaje con 3.3V, además de 2 PINES de GND, lo que permitiría alimentar todo el circuito del detector Geiger sin problema, además que es capaz de ser alimentado por Power Banks y por Baterías de diferentes tipos, desde recargables, Li-Ion, LiPo y Ni Cd, ya que está construido para no requiere demasiada corriente en su arranque, provocando agotamiento prematuro de las baterías.

En general, el ESP32 es una opción más potente y versátil que el Arduino UNO, o Arduino MEGA y es más adecuado para aplicaciones avanzadas que requieren conectividad inalámbrica, procesamiento intensivo, procesamiento de señales analógicas y digitales y procesamiento de múltiples tareas. Ya que es justo lo que se necesita en este proyecto, un cerebro lo suficientemente capaz de manejar y que además sea pequeño. Pero el punto estrella es que es una tarjeta de desarrollo, lo que significa que con un cable USB y una computadora, se puede programar.

Por último, la generación del código se hará en función de los eventos Geiger registrados en el Sub-Cerebro (ATTINY2313-A) con el código de Jeff Keyzer, midiendo primero:

- Las cuentas por segundo CPS.
- Las cuentas por minuto CPM.
- La tasa de dosis equivalente al tubo SBM-20 ( $\mu\text{SV}/\text{hr}$ ).
- El contador total en formato HH:MM:SS.
- La Temperatura y Humedad relativas en tiempo real.
- La conexión Wifi con una red cercana.
- ✓ La creación de una página web con todos los datos señalados arriba.

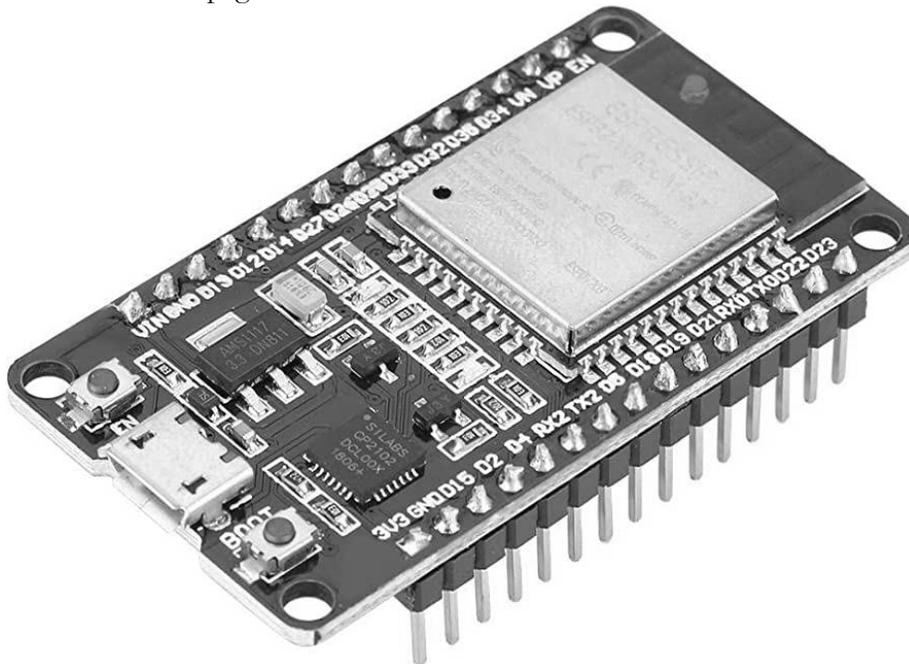


Figura 15 ESP32 Amazon. Disponible: <https://www.amazon.com.mx/desarrollo-Procesador-microcontrolador-Bluetooth-integrado/dp/B07RY9MVCV>.

---

---

### 2.1.4 OLED AdafruitSSD1306 y Dispositivos de Control.

El dispositivo previsto para poder llevar a cabo la misión de poder reportar los datos al operador es un Display de tipo OLED, el dispositivo seleccionado es el AdafruitSSD1306 el cual, simplemente, es un Display, apreciado en la [Figura 16] mucho más avanzado que un LCD 16x2 ordinario. En las primeras fases del proyecto, como se ha mencionado, se trabajó con un Arduino UNO y un LCD 16x2, ambos dispositivos tienen un tamaño considerable, no tan aptos para un modelo compacto como el que se plantea. Además de ello, las ventajas que presentan respecto uno de otro son las siguientes:

- Ventajas del Display AdafruitSSD1306:
  - 1.- El AdafruitSSD1306 es una pantalla OLED, lo que significa que tiene una excelente calidad de imagen con colores vibrantes y negros más oscuros que los de una pantalla LCD.
  - 2.- Tiene un bajo consumo de energía, lo que es ideal para proyectos que funcionan con baterías.
  - 3.- Es muy delgado y compacto, lo que lo hace ideal para proyectos con espacio limitado.

En resumen, la elección entre un Display AdafruitSSD1306 y un LCD 16x2 depende del tipo de información que se quiera mostrar y del presupuesto del proyecto. El AdafruitSSD1306 es ideal para mostrar gráficos y tiene un bajo consumo de energía, mientras que el LCD 16x2 es una opción económica para mostrar texto y es fácil de usar. Pero en términos de costo, es mucho mejor el OLED AdafruitSSD1306, ya que posee un adaptador i2C que reduce el número de PINES necesarios para conectarse a la tarjeta, generalmente solo SCL y SDA, mientras que el LCD necesita los 16 PINES Conectados, el AdafruitSSD1306 solo necesita dos, más otros dos de alimentación.

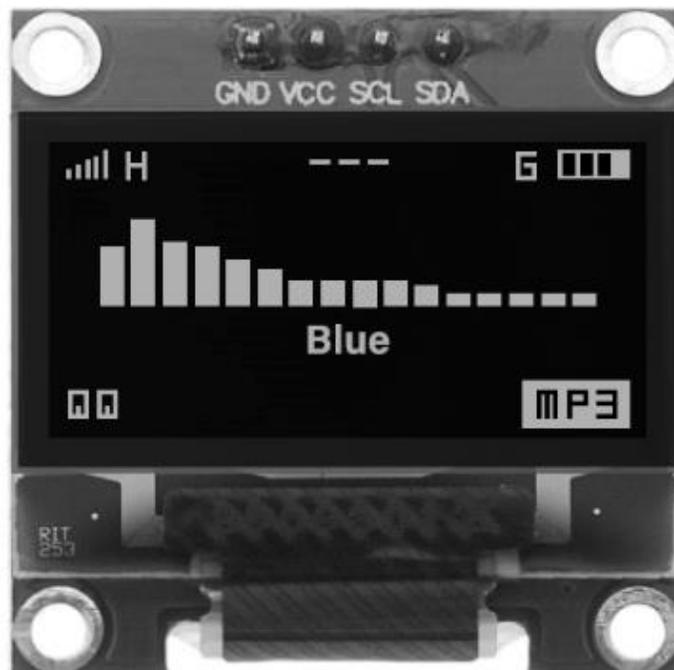


Figura 16 Displau OLED AdafruitSSD1306, Naver. Disponible:  
<https://m.blog.naver.com/esemparker/221884149101>

---

---

### 2.1.5 El Microcontrolador ATTINY2313-A.

Llegando a esta sección, nos encontramos en el Sub-Cerebro que se mencionaba, este dispositivo es sumamente importante por muchas razones, pero comencemos describiendo que es este dispositivo, mencionando unas cuestiones técnicas. El microcontrolador ATTINY2313 es un chip de baja potencia de la familia AVR de microcontroladores de la empresa Atmel, que se lanzó al mercado en 2002, como el mostrado en la [Figura 19]. A continuación, se detallan algunas de sus características principales:

- **Arquitectura:** Está basado en una arquitectura RISC de 8 bits, lo que significa que es capaz de realizar instrucciones de forma rápida y eficiente.
- **Frecuencia de reloj:** El microcontrolador tiene una frecuencia de reloj de hasta 20 MHz, lo que permite una mayor velocidad de procesamiento.
- **Memoria:** Tiene una memoria Flash de 2 KB para almacenar el programa, una memoria SRAM de 128 bytes para almacenamiento temporal de datos y una memoria EEPROM de 128 bytes para almacenamiento de datos no volátiles.
- **Periféricos:** El microcontrolador cuenta con una amplia variedad de periféricos, incluyendo dos temporizadores de 8 bits, un temporizador de 16 bits, un contador de eventos, dos canales de captura y comparación, seis canales de entrada/salida de propósito general y un USART (Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter) para comunicación serial.
- **Consumo de energía:** Es un chip de baja potencia, con un consumo de energía muy bajo, lo que lo hace ideal para proyectos que funcionan con baterías o energía solar.
- **Compatibilidad:** Es compatible con el software de programación y las herramientas de desarrollo de Atmel, lo que hace que sea fácil de usar para aquellos que ya están familiarizados con otros microcontroladores de la familia AVR.

Por lo tanto, es una opción popular para una amplia variedad de proyectos electrónicos debido a su bajo costo, tamaño compacto, eficiencia energética y amplia gama de periféricos. Entonces, la razón de utilizarlo, además de continuar con la sinergia con el diseño de Jeff Keyzer, es que al actuar como memoria AVR, tiene facultades de procesamiento de información, conversión A/D y, sobre todo bastante compacta. Con 20 PINES a su disposición, y 0.7 cm de ancho y 2.6 cm de largo, es una opción perfecta para mantener esa parte de un diseño compacto.

Ahora bien, el ATTINY2313 tiene dos particularidades, al ser un microcontrolador tradicional, es necesario programarlo con dispositivos grabadores externos, muchos de ellos de alto costo, por lo que podría resultar algo incómodo si se planteara hacer este proyecto de forma austera y casera, hay programadores caseros hoy en día, pero al final es consideración de cada situación. Al ser un microcontrolador potente, no es tan costoso. Entonces, sus funciones en este proyecto son:

- 1) Procesamiento de la señal amplificada del SBM-20
- 2) Control de señales externas
- 3) Conversión A/D interna
- 4) Output de señal Auditiva (Buzzer)
- 5) Output de señal Visual (Diodo LED)
- 6) Botón de control para la señal auditiva
- 7) Exportación de señal procesada Digital
- 8) Gestión de puertos seriales

---

---

Como se puede apreciar, es un dispositivo que en este particular proyecto, tiene muchas funciones y tareas por realizar, es más fácil entenderlo porque ya se ha visto que la física Geiger involucra eventos, por lo que este microcontrolador se enfoca única y exclusivamente en ello, un PIN tiene los conteos digitales en tiempo real, que se pasan al “Cerebro Mayor” (ESP32) para que entonces haga su trabajo reportando en el hardware mencionado y en la página web.

¿Por qué no utilizar un Arduino MEGA, un Raspberry, u otro microcontrolador ahorrando la ATTINY2313?

Bastante simple, al estar enfocados en diferentes tareas, involucrar a una tarjeta a realizar absolutamente todo, corre el riesgo de que, al momento de alcanzar más de la velocidad de procesamiento, se llegue a un punto donde se paralice el sistema y se saturen los núcleos de memoria, porque se crean 3 casos de captación radiación, alto medio y bajo, con esto los cálculos que se deben hacer son mayores en radiaciones altas como gamma y X, si se entregan numerosos pulsos para ser convertidos de A/D y luego llevar esas señales a un PIN de salida LED y otro PIN de salida Buzzer, se tiene el riesgo de que las cuentas ya no sean certeras. El ESP32, con sus numerosos pines disponibles, tampoco sería capaz de soportar tanta carga para este proyecto particular. Se entenderá mejor en la sección de -Códigos utilizados.

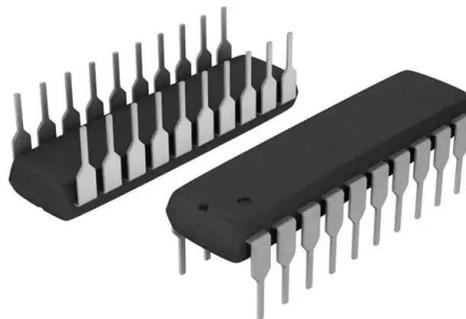


Figura 19 Encapsulado de 20 PINES (2023) OpenAi.com. Disponible en: <https://labs.openai.com/>

### 2.1.6 Sensor de Temperatura y Humedad DHT22

Dada la importancia en el campo de medir todas las variables ambientales presentes, de forma plausible y confiable, se decidió añadir este sensor que funge como otro método de poder conocer que ocurre alrededor, con esas variables analógicas que el ser humano no puede detectar. Sí, sabemos empíricamente que hace “Calor” o “Frío” pero no a niveles exactos con una escala termodinámica.

Ahora bien, en el campo, en una instalación nuclear, en una instalación médica, o en algún sitio de desastre que involucre materiales peligrosos, conocer la temperatura es muy útil para un agente de seguridad o para la población civil circundante. Por ejemplo, en la instalación Vladimir Ilich Lenin, una vez que ocurrió el desastre, se relata que el agua de un contenedor del reactor aumentó de temperatura, los voluntarios y técnicos soviéticos que fueron encargados de contener una posible segunda explosión detectaron un aumento en la temperatura del agua que rodeaba la cámara, algunos tenían trajes especiales, pero el fin es que se pueda evitar el contacto a toda costa. En ese momento no poseían dispositivos así, por lo que procederemos a describirlo técnicamente, físicamente luce como la [Figura 20].

- 
- 
- **Rango de medición:** El DHT22 puede medir la temperatura en un rango de -40 a 80 grados Celsius y la humedad relativa en un rango de 0 a 100%.
  - **Precisión:** El sensor tiene una precisión de +/- 0.5 grados Celsius en la medición de la temperatura y de +/- 2% en la medición de la humedad relativa, suficiente para el propósito de este proyecto.
  - **Salida de datos:** Proporciona los datos de temperatura y humedad a través de una señal digital en formato binario.
  - **Conexión:** Se conecta a un microcontrolador mediante un solo cable que transmite tanto la señal de datos como la alimentación eléctrica.
  - **Calibración:** Está calibrado en fábrica y no requiere calibración adicional para su uso.
  - **Tamaño y forma:** Tiene un tamaño compacto y una forma rectangular, lo que lo hace fácil de integrar en proyectos electrónicos.

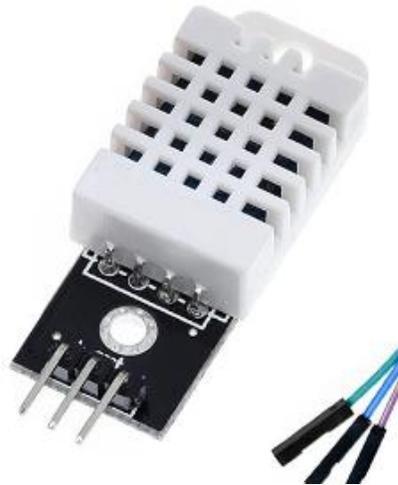


Figura 20 DHT22 (2022) Amazon. Disponible: <https://www.amazon.com.mx/HiLetgo-temperatura-reemplazo-pr%C3%A1ctica-electr%C3%B3nica/dp/B01N9BA004>

### 2.1.7 Diseño del PCB con Autodesk EAGLE.

En esta sección, se culmina toda la parte de diseño electrónico, se tiene finalmente el diseño de la placa PCB personalizada para este fin. El software elegido es Autodesk EAGLE, es un software bastante útil para poder concebir diseños PCB de muchas maneras, desde generar el diseño por el acomodo circuital como si fuera una simulación, es decir, se toman los símbolos electrónicos y se colocan con cables a tierra, a voltaje y demás y el software “Va encontrando el camino” para construir las pistas del PCB.

Un diseño PCB (*Printed Circuit Board*) se refiere a aquel proceso de diseñar y crear una placa de circuito impreso, que es una placa plana y aislante que se utiliza para conectar los componentes electrónicos en un circuito eléctrico.

Permite al diseñador crear un esquema detallado del circuito eléctrico y luego utilizar herramientas de diseño para colocación y enrutamiento de los componentes en la placa.

---

---

El proceso de diseño PCB implicó varias etapas, como la creación del esquema eléctrico, la selección de los componentes, la disposición de los componentes en la placa, la asignación de las pistas de conexión entre los componentes y la creación de la capa de impresión que contiene la información del diseño de la placa.

Una vez que se terminó el diseño PCB, existe la posibilidad de enviar a una empresa que se especializa en la fabricación de placas de circuito impreso. La empresa utiliza el diseño para crear una placa de circuito impreso que tenga el mismo diseño de pistas y orificios que se han diseñado en el software. Una vez que la placa se fabrica, los componentes electrónicos se sueldan en su lugar y la placa se integra en el dispositivo electrónico final.

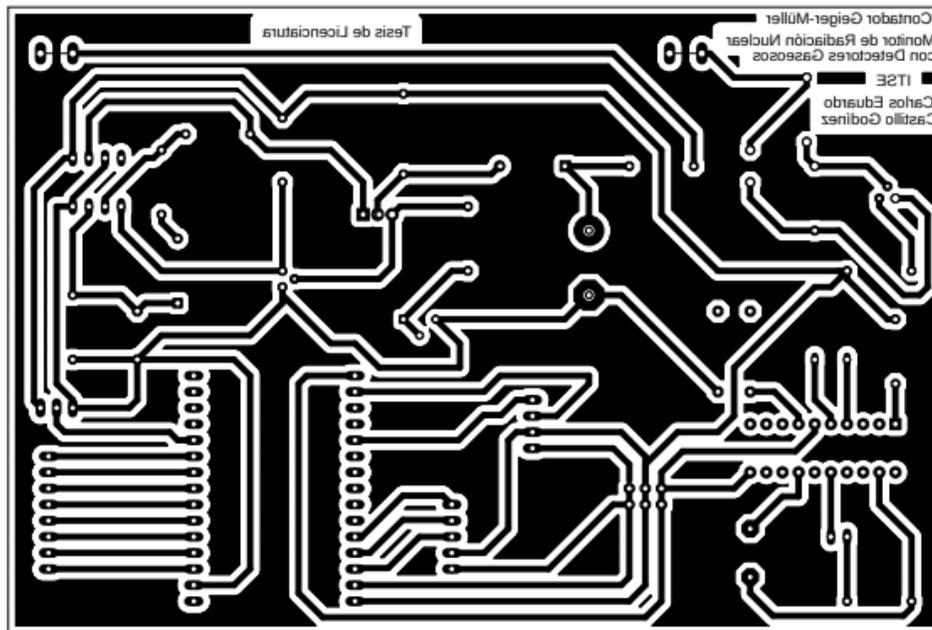


Figura 21 Forma final del diseño PCB utilizado en la tesis.

### 2.1.8 Armadura y portabilidad.

La forma final del proyecto es variable, puede ser posible añadir una carcasa de plástico o bien, un protector sencillo producto de impresión 3D, con el diseño específico para cada aplicación, es decir, que puede ser añadido algún módulo adicional, y expandir el tamaño.

Para fines de este trabajo, solo se considerará el producto final como un circuito sin ninguna armadura particular, dado que el pedido con las medidas exactas resultaría costoso y el objetivo es diseñarlo lo más asequible posible. Resultaría más provechoso si se intentase realizar un lote de muchos monitores para la venta, donde la protección física exterior es importante. La portabilidad si que lo es, en el diseño final se considera un diseño más compacto que los modelos de Contadores Geiger tradicionales, y con la electrónica moderna se diseñó la placa para aguantar todo ese proceso garantizando la operabilidad.



Figura 22 Carcasa 3D para el modelo MightyOhm, Cults3D. Consultada en: <https://cults3d.com/es/modelo-3d/herramientas/mightyohm-geiger-counter-case> .

## 2.2 Modelos Estadísticos Previstos.

En esta sección se analizan las partes matemáticas, simplemente posibles para un circuito mucho mayor, un circuito que sea capaz de trasladar los datos a software estadístico, todo ello con el uso del poder del ESP32 y su conectividad Wifi. El contador Geiger-Müller cuenta el número de partículas ionizantes que pasan a través del gas ionizable en un tubo de Geiger-Müller. El número de partículas se convierte en una medida de la actividad radiactiva presente en el ambiente. Hay varios modelos estadísticos que se utilizan comúnmente en la interpretación de los datos del contador Geiger-Müller, incluyendo:

- **Modelo de Poisson:** Utilizado para calcular la probabilidad de que se detecte un cierto número de partículas en un intervalo de tiempo dado. Se asume que la probabilidad de detectar una partícula es constante e independiente de la detección de otras partículas, y que la tasa media de detección de partículas es conocida.
- **Modelo de distribución normal:** Empleado para calcular la incertidumbre en la medición del número de partículas. Se asume que los errores de medición se distribuyen normalmente alrededor del valor medio.
- **Modelo de distribución log-normal:** Es útil para modelar la distribución de las concentraciones de radionucleidos en una muestra. Se asume que la distribución de las concentraciones es asimétrica y que los valores extremos tienen una mayor influencia en la distribución.

---

---

### 2.2.1 Aplicación de los Modelos Estadísticos.

En la sección de matemática aplicada, se tiene que cada uno de los modelos, va a depender estrictamente de un supuesto, que es escalar el proyecto a un nivel macro, donde se realicen tablas de datos, histogramas de conteos, dosis, etc., y cada uno de los posibles desenlaces va a ser acorde a cada necesidad. En este caso, con el uso del ESP32, se tiene la enorme ventaja de su tecnología, donde ella permite muchas cuestiones estadísticas, desde aplicaciones de fórmulas en el código, hasta la creación de una página web capaz de enlazarse con las proyecciones buscadas. En este caso, en este proyecto, no se tomará esa parte, sin embargo, es útil mencionarla, ya que demuestra la escalabilidad de este monitor, a no solo ser de campo, sino con el uso de quizá servidores, se puedan almacenar los datos dependiendo el día, hora local, hora del contador, máximo de conteos, etc. En fin, es solamente una posibilidad que tiene el proyecto para algo todavía más ambicioso.

### 2.2.2 Propagación del Error.

Matemáticamente hablando, la propagación del error en un contador Geiger-Müller se refiere a cómo los errores en la medición de la tasa de conteo de partículas, o bien, la tasa de detección que se propagan a través de los cálculos para obtener la actividad radiactiva total. Se puede realizar utilizando técnicas estadísticas, y en general, se basa en el cálculo de las varianzas de las mediciones y su covarianza. En el caso de un contador Geiger-Müller, se pueden identificar tres fuentes principales de error que contribuyen a la incertidumbre en la medición:

- **Error en la tasa de conteo:** Hace referencia a la incertidumbre en la medición de la tasa de detección de partículas. Se puede cuantificar utilizando estadísticas de Poisson, que describen la distribución de las fluctuaciones estadísticas en la detección de partículas.
- **Error en la eficiencia de detección:** También hace alusión a la incertidumbre en la eficiencia de detección del detector para partículas de diferentes energías. La eficiencia de detección depende del tipo de partícula y de la energía de la radiación, y puede ser difícil de medir con precisión.
- **Error en el factor de calibración:** Es decir, la incertidumbre en el factor de calibración utilizado para convertir la tasa de conteo en una actividad radiactiva total. El factor de calibración depende de las características del detector y del radionúclido que se está midiendo.

La propagación del error puede ser un proceso complejo, y puede requerir la utilización de técnicas avanzadas de estadística y modelización. Es relevante saber que la precisión de la medición final dependerá de la calidad de los datos de entrada y de la precisión de los cálculos utilizados para convertir la tasa de conteo en una actividad radiactiva total.

---

---

### 2.2.3 Límites de Detectabilidad.

Matemáticamente hablando, estos límites dependen de varios factores, como el tipo de radiación que se está midiendo, el tipo de detector, el tiempo de integración y el nivel de fondo presente en el entorno de medición. En general, el límite de detección se define como la actividad radiactiva mínima que puede detectar el contador Geiger-Müller con una cierta probabilidad de detección. Esta probabilidad de detección puede ser fijada en un nivel específico, como el 95% o el 99%, y se calcula utilizando métodos estadísticos, como los mencionados anteriormente.

El límite de detección se puede mejorar reduciendo el nivel de fondo y aumentando el tiempo de integración. Además, la elección del detector adecuado para el tipo de radiación que se está midiendo puede tener un impacto significativo en el límite de detección. Por ejemplo, los detectores de centelleo pueden tener límites de detección más bajos que los contadores Geiger-Müller para ciertos tipos de radiación. Estos límites pueden depender de los criterios de calidad de los datos y de los niveles de confianza utilizados. Por ejemplo, es posible que se requieran múltiples mediciones para aumentar la confianza en los datos y reducir la incertidumbre asociada.

Realmente, los límites de detección pueden ser bastante bajos, en el rango de algunas decenas de *Bq* (*becquerelios*) para ciertos tipos de radiación, pero pueden ser más altos para otros tipos de radiación o en condiciones de alta variabilidad en el nivel de fondo. Independientemente de la técnica de medición utilizada, siempre habrá una incertidumbre asociada con cualquier medición radiactiva, y los límites de detección pueden variar dependiendo del nivel de confianza requerido en los resultados de la medición.

### 2.2.4 Distribución de los Intervalos de Tiempo.

Este sería el punto de término para la parte estrictamente matemática, donde la distribución de los intervalos de tiempo en un contador Geiger-Müller sigue una distribución exponencial. Esta distribución describe el tiempo que transcurre entre dos eventos Poisson consecutivos, donde cada evento representa la detección de una partícula radiactiva por el detector. Podría emplearse para modelar el comportamiento de los detectores de radiación en los que la probabilidad de detección es constante e independiente de la duración del tiempo de medición. En el caso de un contador Geiger-Müller, la probabilidad de que se produzca una descarga eléctrica (que se detecta como un pulso) es proporcional a la cantidad de radiación ionizante presente en el detector en ese momento.

La distribución exponencial se define matemáticamente como:

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}$$

Donde:

$f(t)$  es la densidad de probabilidad de que el intervalo de tiempo entre dos eventos consecutivos sea  $t$  el intervalo de tiempo y  $\lambda$  la tasa de detección promedio en el detector (medida en eventos por unidad de tiempo) y  $e$  es la base del logaritmo natural.

---

---

Posee la propiedad de que no tiene memoria, es decir, la probabilidad de que un evento ocurra en el futuro no está influenciada por el tiempo transcurrido desde el último evento. Esto significa que la probabilidad de que se produzca una detección en el siguiente intervalo de tiempo es independiente del tiempo transcurrido desde la última detección.

Tendría relevancia para analizar los datos de los contadores Geiger-Müller y para determinar la tasa de conteo promedio del detector. Además, para calcular otros parámetros estadísticos importantes, como la desviación estándar de los intervalos de tiempo y la tasa de fondo en el detector.

### **2.3 Detección de la Radiación Nuclear.**

Habiendo señalado mucho del proceso que se incursiona en este ámbito, se puede decir que la detección de radiación nuclear es aquel proceso de medir y detectar la presencia de radiación ionizante emitida por materiales radiactivos o minerales en decaimiento. Recordando, la radiación ionizante se produce cuando los núcleos de los átomos inestables emiten partículas y/o energía en forma de ondas electromagnéticas. Los detectores de radiación son entonces esos dispositivos que pueden detectar esta radiación y medir su intensidad. En esta sección, se culmina esa parte sobre todo lo que conlleva el proceso de detección orientado-única y exclusivamente en este proyecto a los tubos Geiger-Müller, en particular al SBM-20 soviético.

Se dice que es la energía que se emite en forma de partículas u ondas electromagnéticas por el núcleo de un átomo. Lo que significa que tiene suficiente energía para ionizar la materia con la que interactúa. Los átomos inestables, también conocidos como radioisótopos, emiten radiación nuclear como una forma de alcanzar un estado más estable. Hay tres tipos de radiación nuclear:  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  fundamentales para el proyecto. La radiación nuclear se produce de forma natural en la Tierra, a través de la desintegración radiactiva de elementos presentes en la corteza terrestre y en la atmósfera. También puede ser producida artificialmente, por ejemplo, en la generación de energía nuclear o en experimentos científicos.

### **2.4 Sensor Digital Primario, Captador de variable.**

Un sensor digital primario en la detección de radiación es un tipo de detector de radiación que convierte directamente la radiación en señales digitales. A diferencia de los detectores analógicos, que generan una señal analógica que debe ser convertida a una señal digital por un conversor analógico-digital (ADC), los sensores digitales primarios convierten la radiación en señales digitales sin la necesidad de un ADC externo.

Un ejemplo de sensor digital primario sería un detector de silicio para determinar partículas cargadas. Cuando una partícula cargada (como un electrón o un positrón) pasa a través del detector de silicio, ioniza los átomos del material del detector, creando pares de electrones y huecos.

Estos pares de electrones y huecos son recogidos por los electrodos del detector, que generan señales eléctricas que son convertidas en señales digitales por circuitos integrados en el propio detector. Poseen algunas ventajas sobre los detectores analógicos, como una mayor linealidad,

---

---

una mejor resolución y una mayor velocidad de adquisición de datos. También pueden ser más compactos y tener un consumo de energía más bajo, lo que los hace útiles para aplicaciones en las que el espacio y la energía son limitados.

Los captadores de variable, son todos aquellos dispositivos, que hacen referencia a la teoría de instrumentación electrónica avanzada, que son capaces de tomar fragmentos ambientales, considerarlos como una fuente matemática de información, discernir sobre sus propiedades y mostrar al usuario sus características en términos que puede comprender. Un captador de variable sería el DHT22, por ejemplo, capaz de tomar la variable que conocemos como “Temperatura” y “Humedad”, procesarla del ambiente, mandar sus datos a un microcontrolador que sea capaz de entender esos procesos, y reprocesar para poder mandar al ser humano datos sobre esas dos variables.

No puede haber instrumentos de este tipo con Geiger, porque el Geiger no es un dispositivo electrónico y los detectores semiconductores si son captadores de variable.

## **2.5 Acondicionamiento de Entrada.**

Cuando se habla de teoría de instrumentación, cada señal de entrada en todos los sensores debe ser tratada de manera adecuada, en el caso de los sensores analógicos, ellos convierten una señal física en una señal eléctrica analógica, capaz de ser medida y procesada. Para asegurar una medición precisa, es importante acondicionar la señal de entrada del sensor. Entonces, a continuación, mencionamos acondicionamientos estándar en la mayoría de los sensores analógicos:

- **Amplificación:** Aumenta la amplitud de la señal de entrada para que pueda ser medida con mayor precisión. Utilizados comúnmente para aumentar la sensibilidad de los sensores.
- **Filtrado:** Su función es eliminar cualquier ruido o interferencia en la señal de entrada. Los filtros se utilizan para eliminar las señales no deseadas y mejorar la calidad de la señal.
- **Aislamiento:** Protege el circuito de medición de las interferencias electromagnéticas y del ruido eléctrico. Los aisladores se utilizan para evitar que las señales de interferencia entren en el circuito de medición.
- **Linealización:** Convierte la señal de entrada en una señal lineal para que se pueda medir con mayor precisión. Los circuitos de linealización se utilizan para corregir la no linealidad en la respuesta de los sensores.
- **Compensación de temperatura:** Corrige los efectos de la variación de temperatura en la señal de entrada. Los circuitos de compensación de temperatura se utilizan para asegurar que la señal de salida del sensor sea independiente de la temperatura ambiente.

---

---

El principal objetivo del acondicionamiento de señales es lograr un ingreso de señales a un sistema, que sea capaz de leer dichas señales en forma de variables analógicas para convertirlas en un formato compatible con el tipo de sensor que se ha de emplear. En el caso de este proyecto, las señales que se ingresan son de tipo radiactivo, por lo tanto, van a diferir, como ya se ha visto, dependiendo del tipo de decaimiento que se este tratando, por lo que un acondicionamiento general para el tubo Geiger-Müller SBM-20 utilizado no es viable, ya que los sistemas de adquisición conectados son dependientes completamente del comportamiento del SBM-20.

Me explico, un tubo Geiger-Müller, capaz de detectar partículas  $\alpha$  debe tener en su toma de entrada, una malla especial para poder captar esas partículas, además de ser construido por materiales que permitan el paso de energía de este tipo. Pero la idea es que el acondicionamiento de señales, en este caso particular de instrumentación electrónica, es poder tener todos los elementos necesarios mencionados anteriormente, para conseguir el objetivo. Un sistema de acondicionamiento de señales implica tener en cuenta los tipos de variables que se esperan, es decir, si utilizáramos el SBM-20 directamente para medir “La Radiación solar” no vamos a tener el efecto esperado, precisamente, porque, aunque en la frase se encuentre la palabra “Radiación” no necesariamente se refiere al conjunto de todas ellas.

No es posible utilizar un Tubo Geiger-Müller para todo lo que la palabra radiación implica, teniendo eso en cuenta, y recordando toda la teoría física anteriormente relatada, el acondicionamiento de señal es un conjunto de sistemas para un fin único y determinado por cuestiones de origen físico.

En este caso, para poder cumplir con todo lo que menciona la teoría de instrumentación, para conseguir un sistema de acondicionamiento completo, se requeriría un Sistema de Adquisición de Datos, el cual es una preparación para el sistema, de poder comenzar a recibir todas las señales analógicas que se le presenten, con ese sistema se esperarían una serie de datos resultantes para ser convertidos en señales digitales, puesto que es la única manera de poder trabajarlas para un operador final.

El sistema de adquisición de datos en este proyecto es la memoria ATTINY2313, esa memoria, es capaz de llevar a cabo la conversión de la señal, en función de lo que el SBM-20 le vaya pasando, recoge las señales, con su convertidor A/D interno que es programable por código, transforma los pulsos a señales eléctricas de nivel superior.

Una vez que se ha determinado la conversión, el sistema de la ATTINY2313 hace un proceso de linealización, donde se le asigna una correspondencia a una magnitud física, en este caso, señales digitales completas, donde el código de la memoria interpreta cada uno de los eventos como debe hacerlo, cada parámetro de linealización es evaluado por el código de la memoria.

Lo que en este proyecto no puede suceder, es el proceso de filtrado, y el aislamiento, dado que el tubo SBM-20 tiene características internas propias y únicas para conseguirlo, el proceso de filtrado no tiene mucho sentido porque al ser relleno de gas, solo detectará las partículas con posibilidad de ionización, lo que responde a la otra cuestión, no resulta conveniente aislar al SBM-20 porque no es capaz de detectar partículas  $\alpha$ , de ser así, se añadiría una malla especial

---

---

para ello, pero al no ser afectado por interferencia electromagnética ni térmica, el tubo SBM-20 necesitaría estar en contacto con el ambiente para poder hacer su trabajo precisamente.

## 2.6 Adquisición de Señales analógicas radiactivas.

En esta sección se aborda la continuación de los sistemas de acondicionamiento, pero con otra óptica, es decir, la adquisición de señales analógicas responde directamente a lo ya mencionado, pero hablando de variables radiactivas, el tubo Geiger-Müller SBM-20 se utilizará para detectar partículas ionizantes. A diferencia de los sensores analógicos típicos, el SBM-20 y los demás tubos no producen una señal analógica continua proporcional a la cantidad de radiación detectada. En cambio, producen una señal digital (pulsos) cada vez que detectan una partícula.

Sin embargo, es posible conectar un tubo Geiger-Müller a un circuito acondicionador de señal que convierta las señales digitales en unas señales analógicas proporcionales a la cantidad de radiación detectada. En este caso, el tubo Geiger-Müller se consideraría un sensor analógico. Pero ello, el tubo Geiger-Müller se utilizará como detector de radiación para mediciones cualitativas, y su salida es principalmente una serie de pulsos digitales.

## 2.7 Conversión Analógico a Digital.

En esta parte, se analizan todas las funciones de este proyecto, es decir, lograr obtener una “traducción” plausible de lo que nos ha entregado el tubo Geiger-Müller SBM-20, es decir la conversión Analógica a Digital. Es el proceso de convertir una señal analógica en una señal digital logrando ser procesada por un sistema afín a la electrónica digital, como un microcontrolador o microprocesador. Los siguientes son los pasos generales de un proceso de conversión A/D:

- 1.- **Muestreo:** la señal analógica se muestrea a una tasa determinada, indicando que se toman mediciones de la señal en intervalos regulares de tiempo. La frecuencia de muestreo debe ser lo suficientemente alta para que se capturen todas las características importantes de la señal analógica.
- 2.- **Cuantificación:** después del muestreo, se debe cuantificar, lo que significa que se aproxima el valor analógico de la señal en una cantidad discreta de pasos, que se llama resolución. La resolución se mide en bits y determina el número de niveles discretos en los que se puede dividir la señal analógica.
- 3.- **Codificación:** la señal cuantificada se codifica en un formato digital que puede ser procesado por el sistema digital seleccionado. Los formatos comunes de codificación son el binario, el octal y el hexadecimal.
- 4.- **Conversión:** la señal digital codificada se envía al sistema digital, donde se procesa.

El proceso de conversión analógica a digital es un proceso crítico en la adquisición de señales analógicas, y es importante tener en cuenta factores como la frecuencia de muestreo, la resolución y la precisión de conversión para obtener resultados precisos y confiables.

---

---

Para poder realizar la conversión del tubo SBM-20, se tiene la consigna de generalizar a un proceso analógico a microcontrolador tipo memoria.

El proceso de conversión analógico a digital con un microcontrolador generalmente implicará los siguientes pasos:

- **Configuración del microcontrolador.** Han de ser configurados los pines de entrada analógica, el modo de A/C y la frecuencia de muestreo. Esto se puede hacer mediante el registro de configuración del microcontrolador o utilizando bibliotecas y funciones específicas del fabricante, en este caso las que contiene ATMEL.
- **Conexión de la señal analógica:** Se enlazará la señal pulsar analógica que se va a convertir al pin de entrada analógica del microcontrolador. Fue importante tener en cuenta el rango de voltaje admitido por el pin y asegurarse de que la señal del SBM-20 no superara ese rango.
- **Inicio de la conversión:** una vez configurado el microcontrolador, se puede iniciar la conversión analógica a digital. Esto se puede hacer mediante el registro de control del A/D.
- **Lectura del resultado:** una vez completada la conversión, el resultado se almacena en un registro de resultado. El resultado de la conversión se puede leer a través de una función específica directa del registro de resultado.
- **Procesamiento del resultado:** el producto de la conversión puede ser procesado en el microcontrolador según los requisitos de los eventos Geiger. Esto puede implicar realizar cálculos, enviar la información a otros dispositivos o tomar decisiones basadas en la intensidad y frecuencia de la radiación.

Ahora bien, teniendo en cuenta lo anterior, cuando se traslada específicamente el deber de la conversión al dispositivo seleccionado, es importante mencionar cómo funciona el proceso. El ATTINY2313 al ser un microcontrolador de la familia AVR de Atmel, incluye un módulo A/D de 10 bits integrado. Para convertir los pulsos generados por un tubo SBM-20 a digitales, se siguieron los siguientes pasos generales:

- 1.- **Conexión del tubo SBM-20:** La salida del SBM-20, se conectó a un amplificador de señal de CA, luego esta se pasó a un pin de entrada digital del ATTINY2313, se seleccionó el 5. El tubo SBM-20 genera un pulso digital cuando detectan una partícula, por lo que un pin de entrada digital es suficiente para detectar los pulsos.
- 2.- **Configuración del pin de entrada digital:** El pin de entrada digital se estableció como una entrada de interrupción externa en el ATTINY2313. Esto permitirá que el microcontrolador detecte automáticamente los pulsos generados por el tubo SBM-20 y ejecute una rutina de interrupción en respuesta.

- 
- 
- 3.- **Configuración del ADC:** Se configuró el conversor analógico/digital del ATTINY2313 para que pueda medir la cantidad de pulsos generados por el tubo SBM-20 en un período de tiempo determinado, con base en los eventos Geiger. Para esto, se puede configurar el conversor para medir la tensión en un pin de entrada analógico que esté conectado al tubo SBM-20. El valor de la conversión analógica a digital se utiliza para medir la frecuencia de los pulsos generados por el tubo SBM-20.
  - 4.- **Interrupción del microcontrolador:** Se estableció una rutina de interrupción en el microcontrolador para que se ejecute cada vez que se detecte un pulso en el pin de entrada digital. Esta rutina de interrupción puede contar los pulsos y almacenar el resultado en una variable global, referida a los eventos Geiger.
  - 5.- **Procesamiento del resultado:** El resultado de la cuenta de pulsos se puede procesar en el microcontrolador según los eventos Geiger, dichos eventos son los siguientes:
    - **Radiación Fluctuante:** Es decir cuando el tubo está en contacto con la radiación medioambiental.
    - **Radiación Baja:** Niveles  $\beta$  a niveles tenues de poca frecuencia, los conteos son esporádicos.
    - **Radiación Media:** Niveles  $\beta$  a nivel intermedio y alto, a “*Hard Beta*” la frecuencia de los conteos aumenta, por lo que el procesamiento es mayor, con relación a los datos como a las salidas, (Respuesta en LED y Buzzer).
    - **Radiación Alta:** Niveles  $\beta$  a nivel alto y  $\gamma$  a nivel bajo-alto, los conteos son muy frecuentes, dependiendo la fuente, en este evento, se dedica mayor cantidad de memoria para no perder ni uno solo de los pulsos salientes del tubo SBM-20.

El procesamiento del resultado es enviado a otros pines, en este caso al pin 7 para la salida al Buzzer y al pin 16 para la salida al LED, así mismo, al pin 11 que posee la facultad de tener ya el producto final de la señal Geiger procesada, el pin 11 es el final de todo este trayecto, aquí, se conectaría finalmente a cualquier Pin digital del ESP32, configurando ciertos parámetros para que lograrse tener el ESP32 conocimiento de cada pulso ya procesado y así, lo lleve al OLED en forma numérica.

### 2.7.1 Conversión A/D por Gaussiana.

En los sistemas conversiones, existe uno capaz de elevar la escalabilidad de los datos obtenidos, esta es la conversión Analógica-Digital por Gaussiana el cuál se refiere al método de conversión analógico a digital empleando una distribución gaussiana para aproximar la función de transferencia de un conversor A/D. Empleado en sistemas de comunicación de alta velocidad y otros sistemas analógicos de alta precisión, y puede ofrecer una mayor resolución y una mejor linealidad que otros métodos de conversión A/D. El proceso de conversión A/D por Gaussiana se puede establecer en los siguientes pasos:

- **Generar una señal gaussiana:** Se genera una señal gaussiana de amplitud A y ancho de banda B. La amplitud A representa la resolución de la conversión, mientras que el ancho de banda B determina la velocidad de la conversión.

- 
- 
- **Amplificar la señal analógica:** La señal analógica que se desea convertir se amplifica para que tenga la misma amplitud que la señal gaussiana.
  - **Mezclar la señal analógica y la señal gaussiana:** La señal analógica y la señal gaussiana se fusionan juntas para formar una señal modulada. Esta señal es filtrada para eliminar cualquier componente de frecuencia no deseado.
  - **Muestreo:** La señal modulada es muestreada a intervalos regulares de tiempo utilizando un reloj. El número de muestras por segundo determina la velocidad de la conversión.
  - **Decodificación:** Las muestras se decodifican mediante un algoritmo científico que utiliza la distribución gaussiana para aproximar la función de transferencia del conversor A/D.
  - **Conversión:** La señal digital resultante es almacenada en un registro de desplazamiento y transferida al procesador para su tratamiento posterior.

Hablamos entonces de que es un método avanzado de conversión A/D capaz de ofrecer una alta precisión y una buena linealidad en sistemas de alta velocidad. No obstante, su implementación es más compleja que otros métodos de conversión, pudiendo requerir hardware especializado y algoritmos avanzados para su implementación.

Este proceso de conversión Analógica-Digital por Gaussiana puede aplicarse a los contadores Geiger-Müller para convertir la señal analógica de pulsos que generan en una señal digital que pueda ser procesada por un microcontrolador. El proceso de conversión A/D por Gaussiana se puede aplicar a los contadores Geiger-Müller de la siguiente manera:

- 1.- **Amplificación:** La señal analógica de pulsos que genera el contador Geiger-Müller se amplifica para que tenga la misma amplitud que la señal gaussiana que se utilizará para la conversión ADC.
- 2.- **Mezcla/Fusión:** La señal analógica amplificada y la señal gaussiana se mezclan para formar una señal modulada. La señal modulada se filtra para eliminar cualquier señal parásita.

Después de ello, son los mismos pasos 3-5 anteriores, es decir se **Muestrea, Decodifica y Convierte**. Por lo que puede mejorar la precisión y la linealidad de la conversión de pulsos analógicos a digitales que se utiliza en los contadores Geiger-Müller. Pero su uso resulta más complicado, es posible si, pero requiere más trabajo en configurar.

¿Dónde podría aplicarse algo así? En una central nuclear con requerimientos de seguridad robustos y certeros, o en laboratorios de energía. En este proyecto vale la pena mencionarlo solo como referencia a que lo que se implementa aquí es algo compacto en todo sentido, pero más allá, existen otras alternativas más poderosas para cada necesidad.

---

---

## 2.8 Aproximación de detección del tipo de isótopo / material.

Para quedar claros en este aspecto, un tubo SBM-20 Geiger-Müller no puede aproximar su detección al tipo de material detectado. Ya que es un detector de radiación que funciona midiendo la cantidad de partículas ionizantes. Cada cantidad de partículas detectadas por el tubo depende principalmente de la energía y la intensidad de la radiación, así como de la distancia entre el tubo y la fuente de radiación.

Aunque diferentes materiales pueden emitir diferentes tipos de radiación, por mencionar algún caso real, el uranio emite principalmente rayos  $\alpha$  mientras que el cesio emite principalmente rayos  $\gamma$ , el tubo SBM-20 Geiger-Müller no puede distinguir entre ellos. Esto se debe a que el tubo no puede medir la composición química de la muestra que está siendo analizada, sino solo la cantidad de partículas ionizantes presentes en ella.

Para determinar el tipo de material que está emitiendo radiación, se necesitan técnicas de análisis de espectroscopía que puedan medir la energía de las partículas detectadas. Estas técnicas utilizan detectores de radiación más sofisticados, como detectores de semiconductores o detectores de centelleo, que pueden proporcionar información sobre la energía y la composición de la radiación emitida por una muestra. Por lo que queda claro que solo así es posible conocerlos en un entorno determinado científicamente. Ahora bien, la aproximación de detección podría quedar como solo eso, una aproximación con estas consideraciones:

Si se tiene una fuente radiactiva calibrada, es decir una muestra que provenga de un laboratorio certificado y se tenga el tipo de elemento/material que se esté manipulando y que, de antemano, después de un análisis ya sea en una cámara especializada, con un detector de centelleo o semejantes, se sepa cual es su comportamiento esperado, se puede discernir con un Contador Geiger-Müller, respecto a la distancia de medición y tamaño, si se trata de una aproximación plausible.

## 2.9 Detección de No de Partículas por $u(t)$ de fotones.

En este punto, se definen las condiciones físicas para la detección singular de cada partícula, con respecto cada unidad temporal de fotones, me explico, la detección del número de partículas por unidad de tiempo  $u(t)$  de fotones es un problema importante en la física, donde la detección se basa en la medición de la radiación electromagnética, que puede ser descrita en términos de la energía de los fotones.

Algunas formas de detección de fotones, algunos de los cuales son:

**Contadores de fotones:** estos son dispositivos electrónicos que cuentan la cantidad de fotones que llegan a un detector en un período de tiempo determinado.

Los contadores de fotones pueden ser dispositivos de conteo único o dispositivos de conteo múltiple, dependiendo de la aplicación.

- 
- 
- 1.- **Detectores de efecto fotoeléctrico:** Basados en el efecto fotoeléctrico, en el cual un fotón incidente sobre un material puede liberar un electrón. Estos miden la cantidad de electrones liberados por los fotones incidentes, lo que se relaciona con la cantidad de fotones.
  - 2.- **Cámaras fotónicas:** Utilizan películas fotográficas o detectores electrónicos para medir la cantidad de fotones que llegan a un área determinada. Tienen utilidad para detectar patrones de luz y para realizar mediciones de distribución espacial de fotones.
  - 3.- **Detectores de correlación:** Son capaces de medir la correlación entre la llegada de fotones en diferentes momentos. Puede ser utilizada para medir la intensidad de la luz y para contar la cantidad de fotones.

Por lo tanto, la detección del número de partículas por  $u(t)$  de fotones se basa en la medición de la energía fotónica, existiendo varios métodos para llevar a cabo esta medición.

El método más adecuado dependerá de la aplicación y de la precisión requerida. Por lo tanto, se llega a esta pregunta, ¿El Tubo Geiger-Müller SBM-20, es capaz de detectar fotones? En teoría sí, un tubo SBM-20 al ser un tipo de detector de radiación, puede detectar la presencia de fotones. El tubo SBM-20 es de algún modo un detector de centelleo de gas, capaz de sentir  $\beta, \gamma$ .

Cuando una partícula ionizante interactúa con el gas dentro del tubo, produce una señal de luz llamada centelleo, que se detecta mediante un fotomultiplicador. Dicha señal lumínica es proporcional a la energía de la partícula incidente y, por lo tanto, se puede utilizar para determinar la cantidad de radiación ionizante presente.

Condicionamente los fotones, al tener energía, pueden interactuar con el gas dentro del tubo y producir ese centelleo detectable. Consiguientemente, el tubo SBM-20 puede entonces manejarse para detectar fotones, no obstante, su eficiencia de detección para fotones individuales puede ser relativamente baja en comparación con los detectores de fotones dedicados ya existentes.

El tubo SBM-20 no es un detector de fotones específico y está diseñado para detectar una amplia gama de radiación ionizante. De esa forma, de ser requerida una detección precisa y sensible de fotones, quizá sea necesario utilizar un detector de fotones específico y optimizado para ese fin.

## **2.10 Método temporal hasta el primer conteo.**

En esta sección se finaliza toda la teoría aplicada en el proyecto del Contador Geiger-Müller, con este método final, esto es, dado al extenso tiempo muerto intrínseco de los tubos Geiger, algunas veces se limitan a aplicaciones en las que la tasa de recuento es relativamente baja. Las correcciones por pérdidas de tiempo muerto son significativas incluso a velocidades de unos cientos de conteos por segundo. A tasas superiores a varios miles por segundo, estas correcciones suelen ser tan grandes que la tasa de recuento real se vuelve muy incierta.

---

---

Con el propósito de ampliar el rango de conteos certeros de los tubos Geiger-Müller más allá de este límite normal, se cuenta con un innovador modo de funcionamiento conocido como método de tiempo hasta el primer conteo. Consiste en la conmutación de alto voltaje aplicado al tubo Geiger entre dos valores: el voltaje de funcionamiento normal y un voltaje inferior que se ajusta para que sea inferior a la tensión mínima necesaria para desarrollar avalanchas en el gas del tubo.

Después de una descarga Geiger, el voltaje se reduce bruscamente al valor inferior y se mantiene ahí durante un "tiempo de espera" fijo (normalmente 1-2 milisegundos). Este tiempo de espera se elige para que sea mayor que el tiempo de recuperación del tubo a la tensión aplicada reducida. Durante este tiempo de espera, los iones positivos generados en la descarga Geiger anterior son transferidos hacia el cátodo y el tubo vuelve a su estado normal.

Al final de este periodo, el voltaje se conmuta de nuevo bruscamente al valor de funcionamiento superior. Una vez realizada esta conmutación, el tubo se encuentra por definición en estado activo, ya que todos los iones han sido eliminados.

En ese momento se pone en marcha un reloj y se registra el tiempo transcurrido hasta que se produce la siguiente descarga Geiger. El voltaje aplicado se reduce de nuevo durante el tiempo de espera fijado y el ciclo se repite varias veces.

Por medio de este proceso, se realiza una serie de mediciones del tiempo transcurrido entre el final del tiempo de espera y la siguiente aparición de un evento dentro del tubo. Cuando se promedian estos intervalos de tiempo, se obtiene una medida del tiempo medio entre un punto arbitrario de la escala temporal y el siguiente evento ocurrido.

Esta técnica está totalmente libre de los efectos del tiempo muerto del detector. Cada período de medición de tiempo comienza con el detector en estado activo y termina cuando se produce el siguiente evento Geiger. La precisión de la medición sólo está limitada por la fuerza de la conmutación de alto voltaje que debe utilizarse para definir el tiempo cero y la incertidumbre en la sincronización del inicio de la descarga Geiger. Dichas incertidumbres pueden ser tan cortas como una décima de microsegundo, de modo que pueden medirse con una precisión razonable intervalos de tiempo medios de unos pocos microsegundos o más.

Este intervalo de tiempo medio corresponde a la ampliación de la tasa de recuento medida a más de  $10^5$  recuentos por segundo, más de dos décadas por encima de lo que permite el funcionamiento convencional del tubo.

También habrá incertidumbres estadísticas asociadas a este tipo de medición. En general, el número de intervalos de tiempo medidos desempeñará el mismo papel que el número de recuentos registrados en una medición de recuento convencional durante un periodo de tiempo fijo. En este caso, se registra un número de recuentos igual al número de intervalos medidos a lo largo de un tiempo vivo total que es igual al producto del número de intervalos multiplicado por su duración media. Por lo tanto, para alcanzar una precisión estadística del 1%, es necesario medir al menos  $10^4$  intervalos de tiempo.

---

---

No obstante, dado que el método se aplica con mayor frecuencia a circunstancias de alta tasa de recuento, se garantizará el registro de un gran número de intervalos en un tiempo total de medición razonablemente corto. En el límite de tasas reales muy altas, la tasa de intervalos medidos se aproxima al recíproco del tiempo de espera fijo que se elija. Si este valor es de 2 ms, la tasa de adquisición de datos se aproxima a 500/s.

(*KNOLL, Glenn F; 214*)



- 
- 
- 6.- El MJE3003G es el encargado de amplificar la señal producida, estabilizarla y transportarla al tubo Geiger-Müller (representado por un Fusible).
  - 7.- La Base del MJE3003G se encarga de recibir tanto la señal del CI, como la energía procesada de la red de salida del Pin 3 del NE555, luego en su colector, conectada a la red de  $V_{CC}$  se tiene la Bobina de Choque cuyo fin es limitar la cantidad de corriente que fluye a través de la carga. Se logra mediante la creación de una oposición al cambio en la corriente, causando una reducción la cantidad de corriente que fluye a través de la carga cuando se producen cambios repentinos en el voltaje.
  - 8.- La bobina de choque se coloca en serie con la carga. Cuando se aplica un voltaje a la carga, la bobina de choque se llena con energía magnética. Cuando se produce un cambio repentino en el voltaje, la bobina de choque se opone a este cambio, creando una sobretensión en la bobina. Esta sobretensión limita la cantidad de corriente que fluye a través de la carga y protege los componentes electrónicos de la fuente de alto voltaje de daños, considerando el voltaje generado para alimentar al SBM-20.
  - 9.- Una vez que se termina el proceso, se pasa al nodo de  $D_1 C_1$  donde se consigue el alto voltaje final, que varía dependiendo las condiciones de diseño, es decir, va a diferir si los componentes estan o no en buen estado y con conexión directa, y si el capacitor  $C_1$  es del valor adecuado, en este caso, por ser de alto voltaje, se utiliza uno de  $0.1\mu F$  a  $1600V$ .
  - 10.- Como se puede notar, el  $D_1$  es quien sale del MJE13003, su propósito es el siguiente, al ser un diodo rectificador de propósito general de alta corriente y velocidad, se emplea en la rectificación de corriente alterna a corriente continua, punto donde se requiere una alta corriente y una baja pérdida de voltaje en directa. El diodo es capaz de soportar una corriente máxima directa de  $1A$  y una tensión inversa máxima de  $600V$ . Y es debido a su velocidad de conmutación rápida, que se utilizar para protección de sobrevoltaje, donde se necesita una respuesta rápida para proteger al tubo Geiger de los picos de voltaje. Este diodo, es útil porque en el proyecto se necesita una corriente elevada y una baja caída de voltaje CD en la rectificación de CA a CD.

Es importante tener en cuenta que se debe utilizar aislamiento eléctrico, limitar la corriente y asegurar que la salida de alto voltaje no dañe el tubo SBM-20, todo ello se logra con el diodo  $D_1$  1N4937 y el capacitor  $C_1$   $0.1\mu F$  a  $1600V$ .  $RV_1$  es utilizado para estabilizar la parte de  $B_2$  y  $E_1$ .

La  $R_2$  del circuito final, es la resistencia que se menciona en la hoja de datos técnicos soviética que está dentro de los valores recomendados para el ánodo. Pasando así a alimentar al SBM-20. Como se aprecia, es pequeña, constituida por elementos pequeños de naturaleza, aquí se cumple la consigna de tener algo compacto para alimentar al protagonista de la tesis SBM-20.

Continuando:

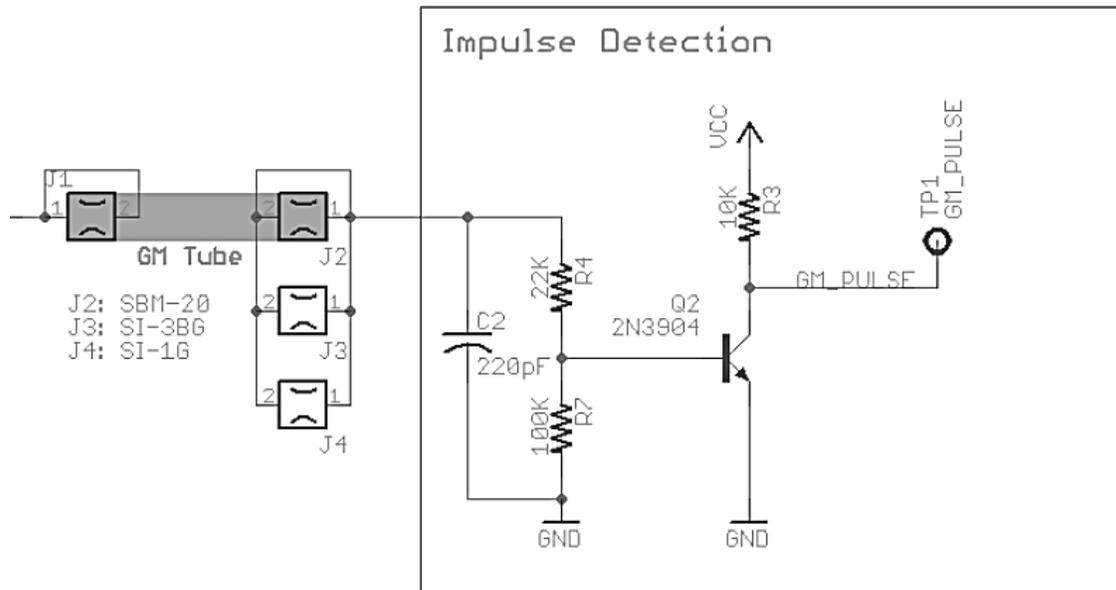


Figura 24 Amplificador de Señal Geiger, (2011) MigthyOHM.com Consultada en: [https://mightyohm.com/files/geiger/geiger\\_sch\\_fixedR5R6.png](https://mightyohm.com/files/geiger/geiger_sch_fixedR5R6.png)

Después de que quedó clara la parte de la generación de alto voltaje, pasamos a la parte de amplificación, como se aprecia su construcción en la [Figura 24] donde precisamente, se emplea un circuito amplificador de señales de CA, para lograr pasar del pulso pequeño de respuesta del SBM-20 a un pulso mayor, completamente digital, (en términos de geometría, es decir una señal cuadrada) que sea mayor en cuanto flancos de subida, detectable energéticamente por un sistema de conversión A/D del microcontrolador planteado.

Si se aprecia más de cerca, se tienen pocos elementos, el principal en esta etapa sería el 2N3904 que es capaz de lograr la amplificación, cada elemento es responsable directo de lograrla, los valores empleados en la red de resistencias de la base, su capacitor, la resistencia del colector, son acordes para lograr este resultado, como se muestra en la [Figura 25].

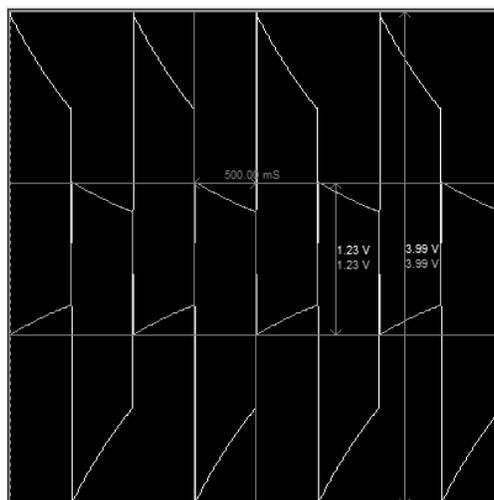


Figura 25 Señal Amplificada respecto a la de entrada con Software Proteus licencia de prueba.

Donde simulando el amplificador, se tiene el efecto esperado, la señal de entrada, que es en realidad la salida del SBM-20, es amplificada en muchos niveles, en este caso, y para ejemplificar, se utilizó un valor de pulso de 1Hz con 50% de anchura de pulso y 1V de flanco de subida. Por lo que queda demostrado que el pequeño amplificador de señales funciona perfectamente para el propósito buscado, utilizando sin problema los  $3.3V_{CC}$ .

Por último:

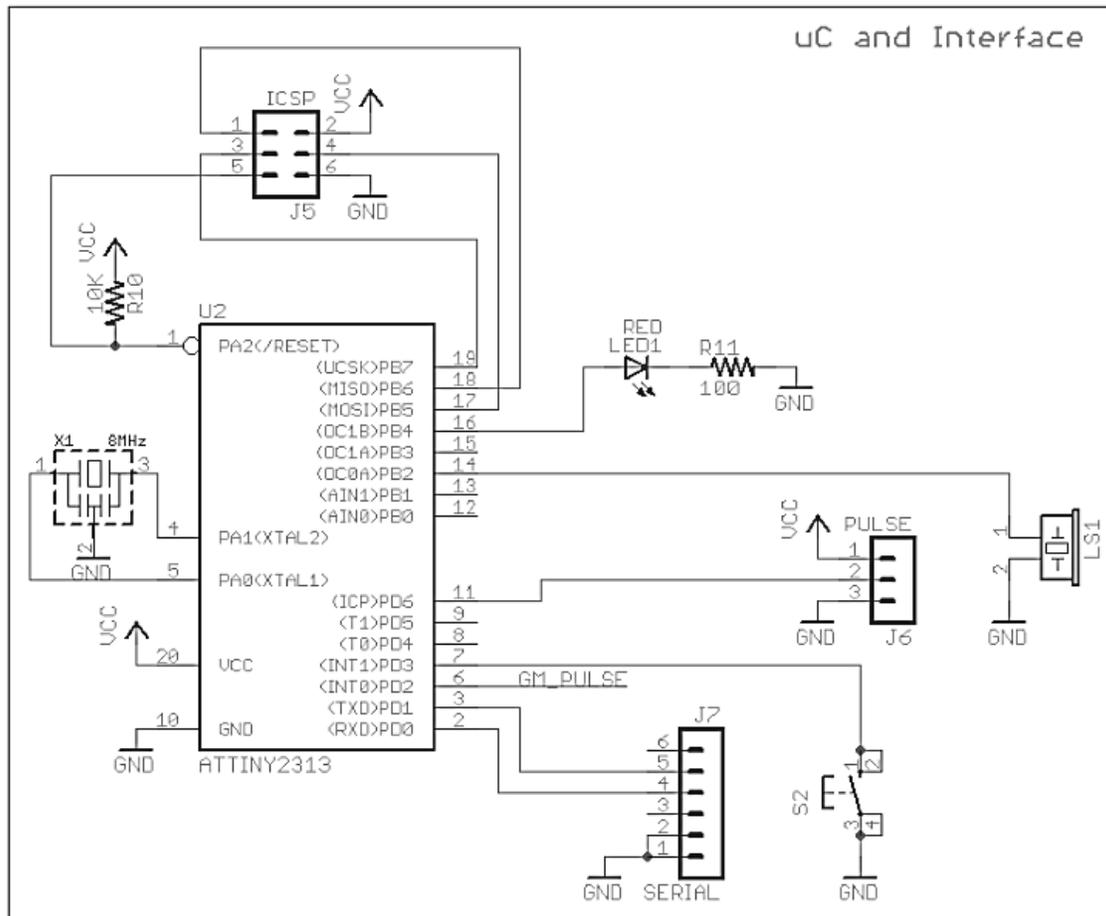


Figura 26 Diagrama circuital del conversor A/D ATTINY2313 MightyOHM.com Consultada en: [https://mightyohm.com/files/geiger/geiger\\_sch\\_fixedR5R6.png](https://mightyohm.com/files/geiger/geiger_sch_fixedR5R6.png)

En el sistema del diseño original, se tiene el microcontrolador como se aprecia en la [Figura 26] superior, capaz de acoplar toda la electrónica anterior para pasar las señales a la memoria ATTINY2313. En este diagrama, el cable del PIN 6, es quien tiene el pulso amplificado del tubo SBM-20, se pasa al módulo *PD2/INT0/XCK/CKOUT*, que tiene como tarea recibir y procesar la señal con las instrucciones de código determinadas. Cabe señalar que muchos de los elementos de los diagramas anteriores no se incluyeron, y otros se modificaron por versiones más actuales.

- En el Pin 1, se encuentra su alimentación, restringida por un resistor de  $10k\Omega$ , con el propósito de proteger al ATTINY2313 de cambios en la red de suministro de voltaje principal, es decir, si se utilizaran baterías, y estas tuvieran cambios abruptos.

- 
- 
- Los pines 2 y 3 poseen una salida serial, no es utilizada en el proyecto, pero si en el diseño de Jeff Keyzer, se pensó así para lograr una escalabilidad.
  - Los pines 4 y 5 tienen un oscilador de cuarzo de **8MHz**, este oscilador se utiliza para proporcionar un reloj de sistema preciso y estable para el microcontrolador. Estos pines están diseñados para trabajar con un oscilador externo porque el ATTINY2313 no tiene un oscilador interno integrado, ya que este proporciona una fuente de reloj precisa y estable para el microcontrolador, lo que es esencial ya que garantiza que funcione a una velocidad constante y predecible, lo que es importante para asegurar que los cálculos y las operaciones se realicen correctamente y en el momento adecuado. Así mismo, ayuda a reducir el ruido y las interferencias que pudieran afectar el reloj del sistema.
  - El Pin 7 tiene la facultad de poder recibir señales binarias precisamente de activación y desactivación para una rutina interna de respuesta auditiva, en otras palabras, activa o silencia al Buzzer.
  - El pin 11, es quizá el más importante, ya que este, *PD6/ICP* es el destino final de la señal Geiger procesada, aquí, yace la señal final ya convertida a un formato digital internamente, para poderse exportar a lo que sería cualquier Pin Digital del ESP32 o de alguna otra tarjeta de desarrollo. El Pin 11 en el diagrama tiene 3 pares de headers, dos son alimentación, ello es útil cuando se ha soldado la memoria y no se tiene posibilidad de alimentar a todas las etapas externamente, en el caso de este proyecto se mantendrán por si suelen resultar útiles.
  - El Pin 14, tiene una salida clonada del pin 11, es similar, pero esta está pensada para alimentar a un buzzer con pulsos energéticos espontáneos iguales a los que recibe el Pin 6, es decir, aquí se procesa la señal auditiva en tiempo real de lo que ocurre en el SBM-20.
  - El Pin 16, es similar, pero funciona con una alerta visual, en este caso, un Diodo LED de potencia nominal, protegido con un resistor de bajo valor, ya que los pulsos no tienen tanta energía eléctrica, se coloca el resistor a bajo nivel principalmente por protección ante flash prolongados por radiaciones altas.
  - Los Pines 18 y 19 son Pines de datos seriales, que fueron concebidos para ser utilizados como fuente de datos, datos propios de los procesos internos de la ATTINY, cada uno de esos datos es enlazado a un sistema especial, como otra tarjeta de desarrollo, en este caso, no tiene mucho sentido utilizarlos porque sólo se toma el Pin 11 como fuente de datos digitales y no seriales.

### **3.2 Búsqueda de Circuitos Equivalentes para simulación por criterio de familias y corrientes.**

Basándonos en el diseño de Jeff Keyzer en Mighty Ohm, cuya publicación de 100% Hardware libre fue en 2011, algunos circuitos originales ya no existen o fueron evolucionados, aquí se enlistan cuales en la [Tabla 2]:

Valor Anterior	Nuevo Valor
<b>Inductor de choque de 10mH</b> FJN3303F	Bobina de Choque Radial RC de 10mH ROHS MJE13003G
<b>Resonador de 8MHz</b>	Cristal de Cuarzo de 8MHz
<b>Capacitor de 0.01μF a 1000V</b>	Capacitor de 0.01μF a 1600V
<b>Microcontrolador Atmel ATTINY2313V-10PU</b>	Microcontrolador Atmel ATTINY2313A-PU

**Tabla 2 Dispositivos sustituidos.**

Como se aprecia, los cambios no son numerosos, comenzando por:

El Inductor de Choque, el diseño anterior utilizaba un componente con marcación “103 QCE” encapsulado arcaico, sin valores adicionales, el nuevo elemento es de tipo estrangulamiento radial, que posee una calidad mejorada y robustez mayor.

El transistor de apoyo en la fuente de alto voltaje, MJE13003G, se modificó puesto que hoy en día no existe más el FJN3303F, el MJE13003G posee características superiores al anterior, tiene valores de amplificación característicos, amplifica el voltaje hasta 700V, en la hoja de datos técnicos se muestra más a detalle, básicamente, tiene mayor resistencia térmica, lo que le permite trabajar con alto voltaje continuamente.

El resonador de 8MHz y un cristal de cuarzo son dos componentes electrónicos diferentes que se utilizan comúnmente como fuentes de reloj u osciladores en circuitos electrónicos. Por un lado, se tiene al cristal de cuarzo, que es un dispositivo piezoeléctrico que utiliza una pieza de cuarzo cortada de una manera específica para generar oscilaciones mecánicas a una frecuencia particular. Cuando se aplica una tensión eléctrica al cristal, este comienza a vibrar a su frecuencia natural de resonancia, lo que produce una señal de reloj estable y precisa. Debido a que la frecuencia de resonancia del cristal de cuarzo se mantiene constante con cambios en la temperatura y otros factores ambientales, los cristales de cuarzo son una fuente de reloj muy precisa y confiable.

Por otro lado, un resonador es un componente electrónico que también se utiliza como fuente de reloj en los circuitos electrónicos. Consiste en una pieza de cerámica o cristal que está diseñada para resonar mecánicamente a una frecuencia específica. Al igual que el cristal de cuarzo, un resonador también es una fuente de reloj estable y precisa, aunque por lo general no tan precisa como un cristal de cuarzo. La principal diferencia entre un cristal de cuarzo y un resonador es que el cristal de cuarzo es más preciso y estable que el resonador. Los cristales de cuarzo también son más costosos y sensibles a la manipulación, mientras que los resonadores son más robustos y menos costosos, pero ya no son comunes.

El capacitor a un valor de operabilidad de 1000V, fue sustituido por otro de 1600V; no tiene mayor diferencia, pero la operabilidad radica en ciertas tolerancias eléctricas del capacitor. Los capacitores de 1000V no son tan comunes hoy en día al menos del valor de 0.01μF.

Por último, el microcontrolador ATTINY2313 tiene mejoras considerables, la principal diferencia entre el ATTINY2313V-10PU y el ATTINY2313A-PU es que el primero es una versión de bajo voltaje del microcontrolador, mientras que el segundo es la versión estándar. El ATTINY2313V-10PU tiene un rango de voltaje de alimentación de 1.8V a 5.5V, mientras que el ATTINY2313A-PU tiene un rango de voltaje de alimentación de 4.5V a 5.5V.

---

---

Esto significa que el ATTINY2313V-10PU es más adecuado para aplicaciones que requieren un bajo consumo de energía y funcionan con baterías, mientras que el ATTINY2313A-PU es más adecuado para aplicaciones que requieren un rendimiento máximo y no están limitados por restricciones de consumo de energía.

Otra diferencia para considerar entre los dos microcontroladores es que el ATTINY2313V-10PU tiene un límite de velocidad de reloj máximo de 10 MHz, mientras que el ATTINY2313A-PU tiene un límite de velocidad de reloj máximo de 20 MHz. Esto significa que el ATTINY2313A-PU puede funcionar a una velocidad de reloj más alta que el ATTINY2313V-10PU, lo que puede ser beneficioso en algunas aplicaciones que requieren un mayor rendimiento.

### 3.3 El generador de pulsos y simulación virtual de radiación.

Por último, la generación de pulsos se hará imitando el comportamiento de una fuente radiactiva, esos pulsos serán arbitrarios con parámetros temporales, es decir para simular la radiación baja, se pondrá frecuencia de 1 segundo con ancho de pulso de 50%, radiación media, 5Hz y ancho de pulso de 75%, radiación alta con 100Hz y ancho de pulso de 75%.

Para concluir, se analizarán las simulaciones compactas considerando la primera versión del diseño, es decir, con un Arduino UNO R3, un LCD 16x2. Con eso en mente, es sencillo simular cada proceso con el software Proteus 8.12 Professional, ya que las librerías de Arduino son gratuitas y es posible tener simulaciones rápidas.

El diseño de simulación difiere en cuanto al diseño final, recordando, el diseño final tiene un ESP32, y una OLED 128x32. El ESP32 no tiene modelos de simulación (Al menos no al momento de realizar esta tesis) y el OLED, requiere de configuraciones adicionales que retrasan la simulación en tiempo real, por lo que los datos mostrados son lo mismo, pero en una pantalla LCD, no en una OLED solo en esta ocasión y para ejemplificar iniciando con la [Figura 27].

Los pulsos simulados tienen la particularidad de imitar algunos de los comportamientos de la radiación esperada, en tiempo real, se vería la ejecución de la simulación mostrando el cambio de los números y mediciones.

Los datos se ordenan de esta forma:

**Esquina superior derecha Cuentas por Minuto (CM):** Se refiere al cálculo realizado donde se crea un promedio cada 60 segundos, las cuentas se cierran en 59 antes de promediar. El cálculo es:

$$CM = \frac{6000}{TiempoTranscurrido(ms)}$$

**Esquina inferior derecha Cuentas Totales (CT):** Es la detección total de cuentas, en el momento que el sistema supere las 1,000 cuentas, se ingresa un nuevo carácter, que es “k” es decir, mayor que 999, sería 1.0k cuentas totales, o bien para ahorrar más espacio y escalar el código se puede llevar a los 9,999 y se transforme en 10.0k. Los cálculos son simples divisiones de  $\frac{CT}{Factor}$ .

**Esquina superior izquierda Dosis Radiactiva ( $\mu Sv/Hr$ ):** El tubo Geiger-Müller SBM-20 tiene un factor de conversión en la hoja de datos técnicos, con lo cual se obtiene un valor neto de 0.0057, el cual es multiplicado por el cálculo de Promedio de cuentas por minuto.

$$\frac{\mu Sv}{Hr} = CMP_{Promedio} \cdot 0.0057$$

¿Qué son los sieverts? Los Sieverts ( $Sv$ ) son una unidad de medida utilizada para cuantificar la dosis equivalente de radiación en términos de su impacto sobre la salud humana. Se utiliza para medir la cantidad de radiación ionizante absorbida por un organismo vivo, y se define como la cantidad de energía depositada por unidad de masa de tejido biológico. Los Sieverts son una unidad de medida relativamente grande, por lo que se utilizan unidades más pequeñas, como el ( $mSv$ ) y el ( $\mu Sv$ ), para medir dosis más bajas.

No toda la radiación es igualmente dañina para la salud, y la cantidad de radiación que puede ser tolerada por un organismo vivo depende de varios factores, como la edad, el IMC, la salud general y la exposición a ciertas fuentes de radiación.

**Esquina inferior izquierda Contador (Timer):** Es un contador sencillo en formato de HH:MM:SS el cual está formado por ciclos *for*, cada ciclo es descrito en el repositorio del código del proyecto, básicamente, inician los bucles cuando se energiza la tarjeta de desarrollo, comienza con conteos de 0 a 59 y cambia a la siguiente posición, exceptuando a HH.

Se ha configurado este reloj para obedecer conteos certeros, es decir, a partir de 1 segundo exacto, 1 segundo con condicional a los parámetros del reloj interno de la tarjeta de desarrollo. El Contador tiene como valores máximos: 24:59:59 a partir de allí, se generaría un bucle, por lo que el reinicio del monitor debe ser empleado para reiniciar la cuenta para cada caso de la [Figura 27] se aprecian cada uno de los datos disponibles.

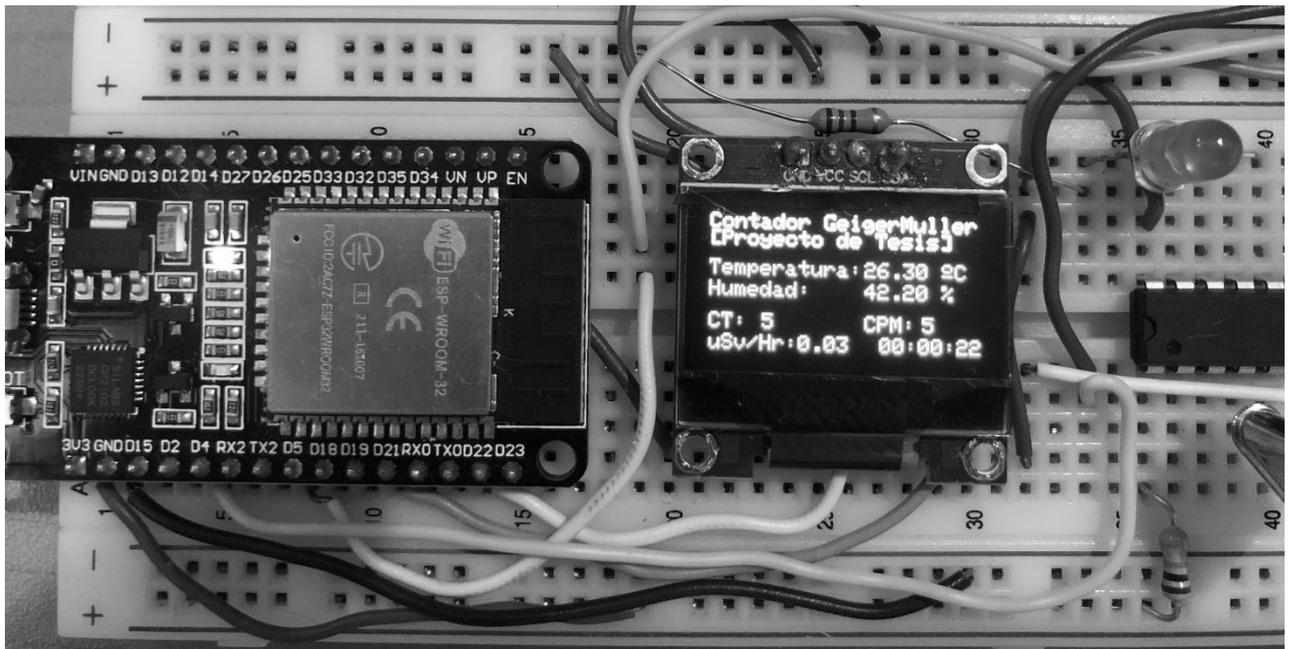


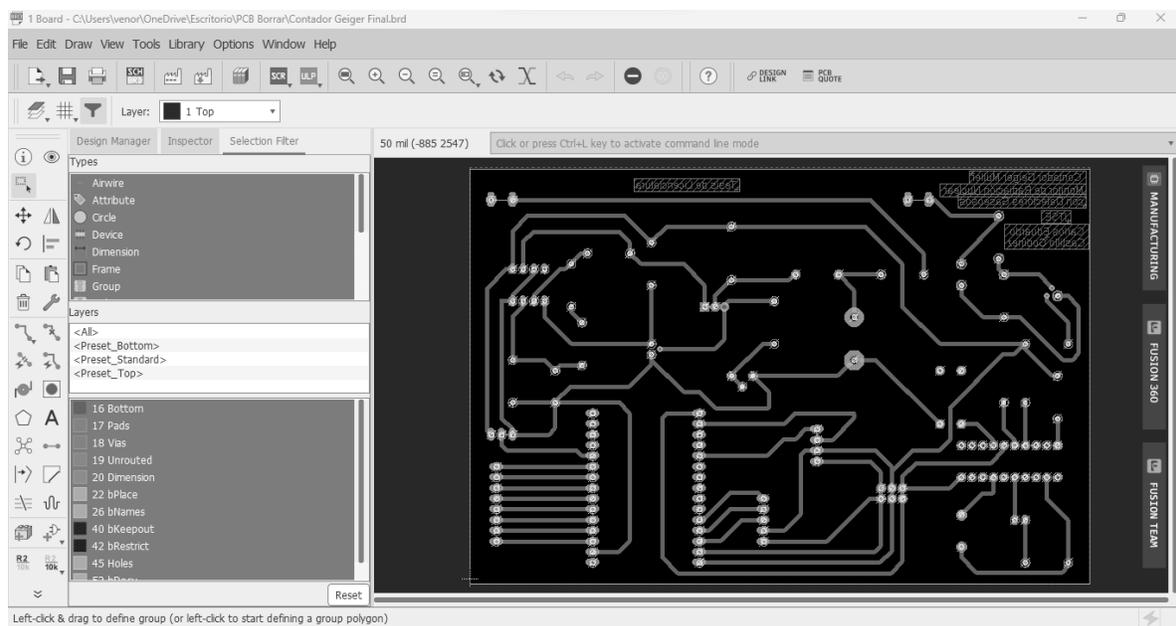
Figura 27 Demostración de funcionamiento de la pantalla OLED con datos.

### 3.4 Diseño de PCB.

Como se mencionó en el capítulo anterior, el diseño final de este proyecto tiene como finalidad cumplir con una funcionalidad y reducción concisas, ello es con el poder disfrutar del sistema sin incomodidad alguna para el operador. Todo se reduce a una placa donde se pueda colocar cada circuito de forma definitiva, evitando claro cortocircuitos, desconexiones de cables, ruido por parte de la placa base, falta de suministro energético o de señal por calidad de transmisores, etc.

La idea es poder generar una placa que simule los Protoboard, en los diseños originales de prototipo, precisamente es útil llevarlos en Protoboard para conectar, probar, desconectar y demás, pero en este caso, se debe garantizar que el sitio final del proyecto sea capaz de responder eléctricamente a cada situación, algunas veces cuando se trabajaba en Protoboard se tenía la situación que un nodo o una pista estuviera dañada o desgastada por el uso normal y esta, no admitiera la energía de la fuente de alto voltaje, lo que provocaba que el tubo SBM-20 solo recibiera 103V aproximadamente en algunos casos, por lo que todo el circuito se volvía inútil. En una PCB las pistas son visibles y son manipulables en el sentido de poderles dar mantenimiento con una pluma de tinta conductiva de ser necesario.

Bien, el PCB en EAGLE de AutoDesk se ve de esta forma en la [Figura 28]:



**Figura 28 Interfaz de Diseño de PCB EAGLE con el esquemático final.**

Como se puede apreciar, el producto presentado tiene todas las opciones de diseño activas, dichas opciones sirven de referencia para demostrar la autoría personal del diseño. Es un diseño personalizado para este trabajo, que tiene características determinadas para ser construido bajo técnicas de planchado de circuito. De haberse diseñado para creación con placa de silicio u otro material, se mostraría el diseño para archivo GERBER con todas las pistas y todas las capas necesarias. EAGLE se utilizó con la licencia proporcionada por la UNAM.

Sobre las capas, se puede apreciar que solo tiene un solo formato, este es el diseño de la capa bottom. En la técnica de planchado de circuitos que implementé solo se necesita dicha capa.

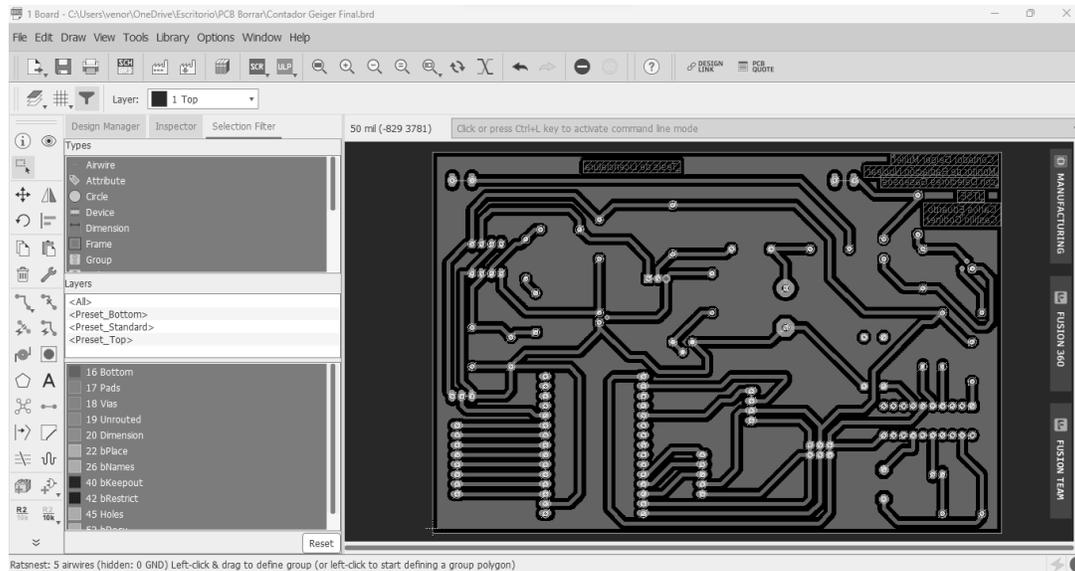


Figura 29 Interfaz de Diseño de PCB EAGLE con *Ratsnest* Activado.

De la [Figura 29] como se aprecia, el diseño final diseñado es respecto a la aplicación de un *Cooper Pour* en todo el contorno del diseño por vía de un polígono, este *Cooper Pour* básicamente se refiere a colorear todo el diseño salvo los contornos de las pistas para que al momento de imprimir en hoja de transferencia el archivo, mantenga solo lo que se ha de usar físicamente. Esta es la última etapa de la creación del PCB, se emplearon componentes dentro del gestor de librerías que son copias 100% fieles a los dispositivos físicos, para que así se tengan medidas exactas del componente y se pueda diseñar con base en números reales.

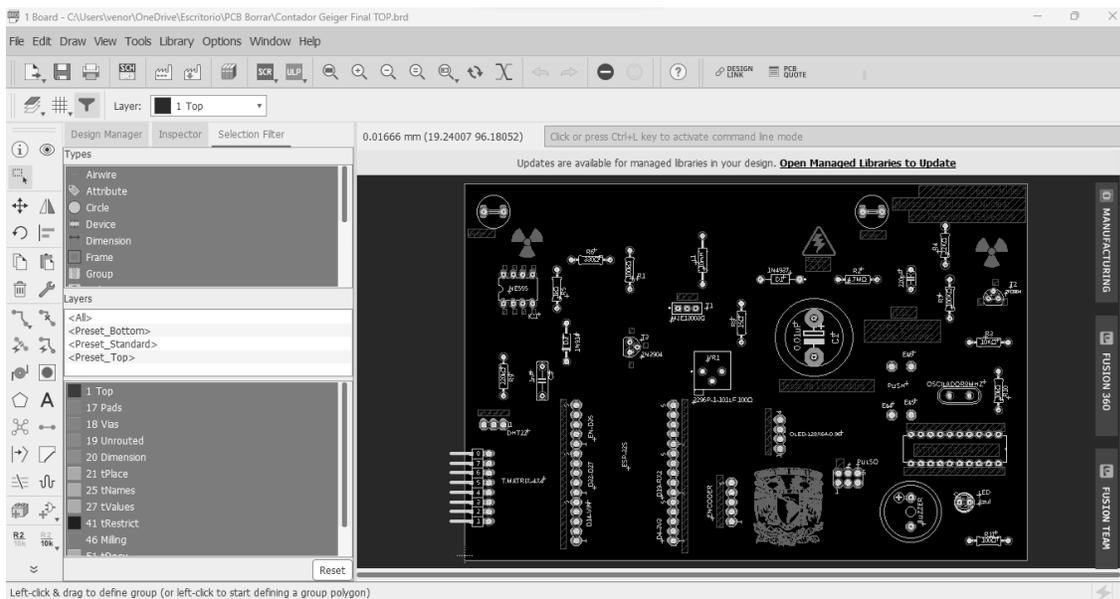


Figura 33 Interfaz de Diseño de Carátula superior con capa Top.

Por último, en el software se produjo la [Figura 33] donde se tiene el diseño de la carátula, donde es el mismo procedimiento, pero con las capas dimensionales activas, el nombre del testigo y algunos diseños alusivos. Todo ello para facilitar la soldadura física posterior.



## Capítulo IV

### Resultados y Conclusiones

#### 4.1 Pruebas de Campo y Recolección de Datos.

Los datos de las pruebas de campo se reducen a los siguientes emisores: Radiación Medioambiental, Capuchón de Lámpara de Gas (Contaminada con Torio [ $Th^{232}$ ]) y Fuente patrón de Cobalto.

Las pruebas de campo se realizaron de la siguiente manera:

1.- Al finalizar cada prototipo del Monitor de Radiación, se ensamblaba y energizaba el sistema comprobando la captación del SBM-20 de las moléculas compatibles.

2.- Se dejaba en cualquier sitio donde tuviese contacto con el medioambiente intentando captar las moléculas  $\beta, \gamma$  del aire.

3.- Se posaba el circuito cerca de los capuchones de lámpara de gas y se hacían pruebas de proximidad, intensidad y conteos. Todos esos datos se relatan en las tablas 3 y 4

4.- Cada análisis y recolección de datos son meramente variables analógicas ambientales, en este caso los datos medidos llámese Radiactividad, Temperatura y Humedad son recolectados directamente en el Display OLED, una funcionalidad de expansión podría ser: Codificar al ESP32 para conectarse a un servidor privado y depositar los datos obtenidos de vez en vez. Esto requiere conexión a dicho servidor, puede ser personal o corporativo; en cualquier caso, los servidores web tienen un costo monetario de renta y/o permanencia y dependen de cada usuario darles mantenimiento y dotarlos de seguridad, así cada medición será guardada en la web.

5.- Como cada medición es reportada en el Display OLED hasta que se presione el reset en el ESP32, todos los datos son efímeros, cabe la posibilidad de anotarlos en un cuaderno o en hojas de datos digitales, esta es la opción asequible

#### 4.2 Presentación de resultados y Análisis de información.

Los resultados en vivo se pueden presentar de las siguientes maneras, en videos o en muestras presenciales, esta última depende de que cada participante este enterado y de acuerdo con que será expuesto a muestras de radiación vivas por un corto periodo de tiempo, que por su exposición tan breve no presentan en absoluto ningún problema. A continuación, se adjuntan códigos QR para acceder a los videos muestra de exposición de radiación en tiempo real medidas por diferentes versiones del monitor de radiación nuclear.



<[Versión Arduino UNO](#) – Tira Contaminada de Torio  $Th^{90}$ >



<[Versión Final ESP32](#) – Radiación Medioambiental Izcalli>

### 4.3 Comparación de resultados con regulaciones atómicas y nucleares.

Las comisiones de regulación de diferentes territorios permiten diferentes límites de exposición, tanto para población civil como para trabajadores propios del sector energético. En este caso, tomaré datos por parte de la Comisión de Regulación Nuclear de Estados Unidos (NRC) y la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS) mexicana descentralizada de la secretaría de energía (SENER) quienes se encargan de regular y revisar el uso y origen de material radiactivo en diferentes instancias del país.

La NRC admite únicamente **1 milisievert (mSv)** al año de dosis efectiva, es decir, la cantidad de radiación total absorbida por el cuerpo humano y considerado la sensibilidad de cada órgano. Tiene mucho sentido porque algunos trabajadores manipulan ciertos elementos sólo con las manos y otros con el cuerpo completo al ingresar a ciertas áreas, por ejemplo.

Para personal civil, científico o gubernamental que estén expuestos a la radiación en el sitio de trabajo, la NRC delimita una dosis efectiva anual de máximo **50 mSv** anuales, con la consigna de que ese número sea mucho menor con buenas prácticas de contención. Por otro lado, la CNSNS mexicana, igualmente establece **1 milisievert (mSv)** anual, comprendido por exposición medioambiental o actividades humanas que involucren fuentes radiactivas. Y la dosis efectiva anual para la población científica, profesional o académica se reduce a máximo **20 mSv** anuales promedios en un periodo de 5 años consecutivos. Para diferentes partes corporales la CNSNS posee límites específicos y dependen del elemento radiactivo.

Es importante tener estos datos ya que las muestras con las que trabajé en el desarrollo de la tesis tienen ciertas consideraciones de manipulación y almacenamiento. Por lo que teniendo como comparativa lo que la autoridad nacional admite es necesario para asegurar que, en ningún momento del desarrollo y exposición de datos, no se corrió ningún riesgo de medición.

Versión	CT	CM	$\mu Sv/hr$	Distancia (cm)	Tiempo (s)
Arduino UNO v 1.1	313	15	0.0855	10	100
Arduino UNO Simplificado	326	16	0.0879	10	100
ESP-32 Protoboard	315	17	0.0945	13	120
ESP-32 Soldado	324	18	0.0963	13	120

**Tabla 3 Registro de Datos Con Tira Contaminada de Torio  $Th^{232}$**

Versión	CT	CM	$\mu Sv/hr$	Distancia (cm)	Tiempo (s)
Arduino UNO v 1.1	23	2	0.026	10	100
Arduino UNO Simplificado	12	3	0.014	10	100
ESP-32 Protoboard	20	6	0.087	13	120
ESP-32 Soldado	25	4	0.074	13	120

**Tabla 4 Registro de Datos Con Radiación Medioambiental Izcalli.**

#### 4.4 Descripción de hallazgos.

Respecto a los datos obtenidos, todos ellos tienden a una clara variabilidad dependiendo de muchos factores:

1.- Construcción circuital y Ruido eléctrico: El primer prototipo creado con Arduino UNO y un Display de 16X2 poseía todos los componentes de Mighty Ohm sin el sensor DHT22, estaba constituido por 3 Protoboard, una de ellas no tenía recubrimiento posterior, por lo que cabe la posibilidad de que algunas veces, existiera ruido eléctrico dependiendo de la superficie que donde se postrara. Fue corregido colocando cinta de aislar. Sin embargo, el Arduino Uno al ser muy grande, debía estar en una base de madera para inmovilizarlo, los cables para el Display LCD eran un problema porque debían llegar a los headers del Arduino, además el LCD debía tener un potenciómetro para controlar el nivel de contraste. Por lo que los componentes aumentaban, además del espacio.

2.- El punto anterior fue resuelto al haber sintetizado muchas cuestiones circuitales, por ejemplo, se emplearon jumpers diferentes para las conexiones y procurando que las puntas se encontrasen en completo contacto con el Protoboard, además los elementos activos y pasivos se cortaron al ras de esta, lo que aseguraba que no existiera dicho ruido, de igual manera los componentes se aislaron unos de otros dejando un espacio razonable entre sí.

3.- Al darme cuenta de que el uso de un Arduino UNO R3 más un Display LCD de 16X2 resultaba en un espacio considerable, decidí reducir ambos a dispositivos mucho más pequeños y por tanto portátiles, el ESP32 y el Display OLED AdafruitSSD1306 además de su tamaño demostraron ser lo suficientemente capaces de poder llevar a cabo la tarea del monitor, así se llega al diseño final, además utilizando el ESP32 como “Gran Cerebro” suministrando energía a todo el circuito, la reducción es evidente y bastante asequible.

4.- La placa fenólica de cobre en la cual esta montado el circuito final, es de buena calidad, de grosor óptimo y de resistencia de material bastante buena, pero al “quemar” el cobre con el cloruro férrico, algunas veces las pistas no solían salir completas del proceso químico, por lo que fue necesario repararlas con una pluma de tinta conductora de cobre.

---

---

En sentido estricto la mayoría de las mediciones realizadas fueron con un punto de comparación, es decir, en la ingeniería, la gran mayoría de los problemas y sus soluciones, parten de un plan de acción tal que sea el más adecuado para la resolución de estos, los puntos de comparación fueron, por ejemplo, ¿Por qué el Contador Geiger modelo Student muestra  $x$  cantidad de CPM y el que realizó Carlos Castillo muestra otros datos? ¿Por qué un Contador Geiger Estadounidense tiene botón de apagado y encendido y no el de Carlos Castillo? Cuestiones de ese estilo hacen válida la premisa de comparación; ¿Por qué convendría realizar el armado del circuito propuesto por Carlos Castillo desde cero si simplemente puedo comprar uno?

En primer lugar el hallazgo principal es que si bien es más cómodo adquirir productos armados a gran escala, sus desventajas son evidentes al momento de usarlas, es decir, con un Contador Geiger Student el Display es monocromático y de tipo LCD, la gran mayoría de los Contadores Geiger Estadounidenses solían basarse en unidades soviéticas, como los Roentgen o Rem, la gran mayoría se basan en unidades internacionales más del lado Occidental, el punto es, que se pueda tener una manera de modificar cada unidad dependiendo el propósito, claro, resultaría sencillo utilizar tablas de conversiones, pero resulta mucho mejor poder modificar el código a conveniencia, modificar la circuitería para soportar otro tipo de tubo, modificar incluso al cerebro, por quizá otro modelo de ESP32 más reciente. En fin, resulta más fácil conseguir un Contador Geiger de algún fabricante, pero resulta ser mucho mejor para un ingeniero construirlo uno mismo, modificando a voluntad todo lo que necesite tanto en Hardware como Software, cuidando siempre el costo.

### Conclusiones

El proceso de creación de esta tesis está motivado en diferentes cuestiones, tanto personales como académicas, en primer lugar, mi particular deseo de explorar una rama adicional de la física que es la energía, en particular de parte radiactiva, pero como aspirante a ITSE, diseñar un sistema capaz de poder detectar todo aquello que con nuestros “Bio Sensores” no podemos, además de cuantificarlos, llámese radiactividad, temperatura y humedad. Al haber elegido la especialidad de Sistemas Analógicos, es de mi competencia indagar en todo aquello que involucre esas variables ambientales que sean posibles de ser medidas con sistemas electrónicos, mi motivación fue satisfecha completamente, porque comencé con una primera versión del monitor, una versión muy grande en cuanto a tamaño y muy incómoda en cuanto a portabilidad, luego fui realizando modificaciones hasta hacerla de una medida tal como los Contadores Geiger modernos de grado industrial, pero de forma DIY, es decir una manera pequeña, compacta, suficiente y sobre todo escalable a futuro. Claro, el modelo presentado requirió de configuraciones para ser fiable en cuanto a mediciones y presentación de datos.

Al realizar este trabajo de tesis, me encontré con muchas dificultades en el camino, en primer lugar, al no tener una formación sólida en física nuclear, requerí indagar en estas cuestiones por diferentes medios, para así entender que era lo que podía esperar al momento de construir este sistema. ¿Para que crear algo si no se de antemano como luce, como se comporta mi variable llamada Radiación? Por ello, y gracias al alcance de la facilidad de la información actual me fue posible sintetizar la disciplina de la física nuclear a sólo lo que un ITSE necesitaría.

Una dificultad bastante contundente fue la búsqueda de los materiales para realizar el circuito, por ejemplo, las Bobinas de Choque, no me fue posible encontrarlas más que en un estuche con varias de ellas pero disponibles sólo en Amazon USA, el Tubo Geiger-Müller SBM-20 fue otro dispositivo complicado de conseguir, en primer lugar es el Tubo más asequible que pude encontrar

---

---

y que obedeciera a los requerimientos del experimento, además de ser el mejor construido, existen muchos otros en el mercado que podrían ser compatibles con el monitor, pero el SBM-20 es el ideal en muchos aspectos como se menciona en el punto 2.1.1.1.8. El SBM-20 fue conseguido también en Amazon USA, a disponibilidad de Stock, por lo que significaba que debían encontrar un tubo guardado desde la era soviética que aun fuera funcional. La memoria ATMEL Attiny2313-A fue otra cuestión complicada, ya que, al momento de adquirirla en un estado limpio, requería grabar el código en ella, al ser un microcontrolador necesité un programador de circuitos, cuestión que de hacerlo DIY resultaría muy complicado y costoso, afortunadamente en la Universidad me fue prestado un programador y el equipo necesario para conseguir la grabación del código en el circuito.

Todo lo anteriormente mencionado fue manejado cuidando los precios para que no resultase en compra de material costoso y resultase en algo no redituable, los demás componentes pasivos y activos fueron fáciles de conseguir, en cuanto al ESP32 y el Display OLED, ellos son dispositivos muy baratos, bastante accesibles y en lo personal muy personalizables. El ESP32 tiene muchas librerías que lo convierten en una tarjeta de desarrollo bastante imprescindible, una de sus funciones, por ejemplo, es su LED interno, que podría ser codificado para sustituir al diodo LED del Contador, su capacidad inalámbrica general, que con ello permitió que los datos capturados pudiesen ser publicados localmente en una página web, mostrando exactamente lo mismo que el Display OLED, claro, con la consigna de que tienen de 10 a 15 segundos de retraso de actualización.

Finalmente, la tesis fue pensada gracias a un tópico de la asignatura de Instrumentación Electrónica Avanzada. Dicha asignatura aborda muchas cuestiones teóricas abordadas aquí con relación a los Sistemas Analógicos. Pero todo lo generado aquí va en relación directa con muchas disciplinas de la carrera de ITSE, en primer lugar la Ingeniería en sí, que aplicándola me permitió simplificar muchas cuestiones que me iba encontrando, pensar cómo resolver problemas de la mejor manera, la parte de las telecomunicaciones es muy breve, aun así aplicable, el ESP32 y su módulo de conectividad me permite crear un monitor de tipo IOT, por lo que ya es una enorme ventaja con respecto a la gran mayoría de los monitores comerciales actuales, la disciplina de las Telecomunicaciones en la carrera obedece a un módulo de especialidad concreto, pero aquí abordé teoría de conexiones inalámbricas, por lo cual queda cubierta un área grosso modo.

La disciplina de los Sistemas es toda la cuestión que parte precisamente de la Ingeniería de sistemas y de la teoría general de sistemas, en ella solo me enfoco a la creación de un medio embebido capaz de trabajar un medio con otro. Quiero decir, que el Monitor de Radiación Nuclear no puede trabajar correctamente a menos que tenga bases sólidas de este conjunto de saberes, el medio embebido es la programación, el código ESP32 que se presenta es generado enteramente por mí, el sustentante de la tesis, considerando mi punto de vista sobre cómo debe ser un buen monitor, o al menos lo que considero imprescindible, además de agregar la escalabilidad futura.

Por último, el 80% del proyecto se basa en la electrónica, tanto analógica como digital en algunos casos, aplicarla en un solo dispositivo y que funcione como se espera es precisamente la prueba de que se culminó el objetivo. La aplicación de la disciplina electrónica es el punto final de la tesis, como se ha observado de toda la carrera de ITSE se tomaron pequeños fragmentos de cada disciplina, para conjuntarlos y crear lo que es expuesto, considero que los objetivos han sido satisfechos y con la posibilidad de añadir muchos otros a futuro. El monitor está listo para uso profesional.

---

---

## Glosario

Código QR: Se refiere a un gráfico de barras o cuadrados, inclusive motas que pueden ser identificados por algún lector óptico que descifra ese gráfico, el propósito es albergar enlaces a diferentes medios digitales sin la necesidad de escribir el enlace en texto, si no que un dispositivo inteligente pueda leerlo y en cuestión de segundos tener acceso al contenido.

DIY: Del Ingles *Do It Yourself* se refiere a proyectos de electrónica que, con el acceso a la información actual y a ciertos componentes, una persona puede crear dispositivos que comúnmente requerían de maquinaria especializada, los proyectos no tendrán una calidad quirúrgica como los industriales, pero si cumplirán un propósito. Proyectos Caseros.

Nube de Datos: Es un espacio destinado al acceso de información digital para aquella persona que tenga ya sea un enlace de acceso o sea dueña del espacio. Las nubes de datos son nodos de almacenamiento propiedad ya sea de empresas o de particulares, garantizando la información siempre y cuando se cuente con acceso a internet y credenciales.

## Bibliografía

1. Boylestad Robert L. Nashlesky, Louis, Electrónica Teoría de Circuitos y Dispositivos Electrónicos, Pearson, 11 Edición, México.
2. Castro Rios, R. S. (2015). Estudio e implementación de un convertidor analógico digital y digital analógico Sigma delta (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
3. GREENING J (1985), Fundamentals of Radiation Dosimetry, Taylor & Francis Group, Estados Unidos.
4. HWEI, Hsu (2013) Señales y Sistemas McGraw Hill serie Schaum Edición cuatro, México
5. KNOLL, Glenn F. Radiation Detection and Measurement 3rd Edition, University of Michigan, Department of radiological sciences, Estados Unidos, 2000
6. KEIM Robert (6 de Mayo 2020). The Nyquist–Shannon Theorem: Understanding Sampled Systems. All About Circuits. <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/nyquist-shannon-theorem-understanding-sampled-systems/>
7. KRANE K.S (1988) Introductory Nuclear Physics, John Wiley & Sons Inc. Estados Unidos
8. MARTIN, Bryan R. Nuclear and Particle Physics an Introduction 2nd Edition, John Willey & Sons, Department of Physics and Astronomy, Inglaterra, 2006
9. Paredes-Martínez, E., de Rivera, L. N., & Cruz-Irisson, M. (2008). Convertidor digital a analógico de un bit. Científica, 12(1), 25-30.
10. P. Horowitz and W. Hill, The Art of Electronics, 2nd ed. Cambridge University Press, 1989, ch. 5.14
11. RASHID, Muhammad H. Electrónica de Potencia, Pearson, 4 Edición, 2016, Estados Unidos.
12. S. Franco, Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits, 3rd ed. McGrawHill, 2002, ch. 10.3.
13. Sears y Zemansky; FREEDMAN, Young Y. Física Universitaria con Física Moderna, Pearson, 14 Edición (2017), México.
14. SLABACK Shleien B, (1998) Handbook of Health Physics and Radiological Health, Williams & Wilkins, 3 Edición, Estados Unidos.
15. TIPPENS, Paul E. Física Conceptos y Aplicaciones, 7 Edición, McGraw Hill (2007), México.
16. US Atomic Energy Comission; G.D. O'KELLEY, Detection and Measurement of Nuclear Radiation, Oak Rifge National Laboratory, Tennessee, Estados Unidos, 1962

---

---

**Apéndice A:** Hojas de Datos Técnicos.

Todas las Hojas técnicas utilizadas están disponibles en la siguiente liga a un servidor de Nube de Datos iCloud. [Aquí.](#)

**Apéndice C:** El Código del ESP32 y de la memoria ATTINY2313-A



[<Version Final ESP32-IOT>](#)



[<ATMEL ATTINY231V-10PU MightyOhm>](#)

**Material de trabajo: Lista de Material (Circuitería y material radiactivo)** 🌐 🛡️ 📐 🌀

Componente	Valor	Cantidad	Referencia	Descripción	Costo (2022) MXN
<b>Tubo Geiger-Müller</b>	SBM-20 Soviético	1	SBM-20	Tubo de acero inoxidable.	\$1,500.00
<b>NE555</b>	Timer	1	U1	Circuito Temporizador.	\$15.00
<b>ATTINY2313A-PU</b>	Microcontrolador	1	U2	Memoria ATMEL programable.	\$350.00
<b>Bobina De Choque Radial</b>	10mH	1	L1	Inductor especial.	\$650.00
<b>Resistor Variable</b>	100 Ω	1	RV1	TrimPot 25 Vueltas.	\$120.00
<b>Resistor</b>	100 kΩ	1	R1	Resistor a 1/2 W	\$5.00
<b>Resistor</b>	4.7 MΩ	1	R2	Resistor a 1/2 W	\$5.00
<b>Resistor</b>	10 kΩ	1	R3	Resistor a 1/2 W	\$5.00
<b>Resistor</b>	22 kΩ	1	R4	Resistor a 1/2 W	\$5.00
<b>Resistor</b>	1 kΩ	1	R5	Resistor a 1/2 W	\$5.00
<b>Resistor</b>	330Ω	1	R6	Resistor a 1/2 W	\$5.00
<b>Resistor</b>	100 kΩ	1	R7	Resistor a 1/2 W	\$5.00
<b>Resistor</b>	15Ω	1	R8	Resistor a 1/2 W	\$5.00
<b>Resistor</b>	220 kΩ	1	R9	Resistor a 1/2 W	\$5.00
<b>Resistor</b>	10 kΩ	1	R10	Resistor a 1/2 W	\$5.00
<b>Resistor</b>	100Ω	1	R11	Resistor a 1/2 W	\$5.00
<b>Transistor</b>	2N3904	2	Q2, Q3	Amplificador de Propósito general NPN.	\$30.00
<b>Transistor</b>	MJE13003G	1	Q1	Amplificador de Alta Potencia	\$150.00
<b>Diodo</b>	1N4937	1	D1	Rectificador de Rápida Recuperación.	\$65.00

<b>Diodo</b>	1N914	1	D2	Zener de gran señal y rápida conmutación.	\$50.00
<b>Diodo</b>	LED	1	D3	Diodo Led de bajo consumo.	\$3.00
<b>Capacitor</b>	0.01 $\mu F$	1	C1	Capacitor Poliéster a 1600V	\$25.00
<b>Capacitor</b>	220 $pF$	1	C2	Capacitor Cerámico a 1000V	\$25.00
<b>Capacitor</b>	1 $nF$	1	C3	Capacitor Tantalio a 50V	\$25.00
<b>Oscilador</b>	8 MHz	1	X2	Oscilador de Cuarzo de 2 Pines	\$120.00
<b>Buzzer</b>	QSI-1410	1	BUZ1	Zumbador de 8mA – 85dB	\$60.00
<b>Push Button</b>	OKY0275	1	BTN1	Botón Pulsador	\$50.00
<b>Header</b>	3	3	25630301RP2	Header M-M	\$1.00
<b>Display OLED</b>	AdafruitSSD1306	1	Montado	OLED con módulo i2C	\$145.00
<b>ESP32s</b>	Doit DevKit V1	1	Montado	Tarjeta de Desarrollo	\$290.00
<b>Armadura</b>	-	-	General	-	\$200.00 - \$300.00

Tabla 5 Material Empleado.