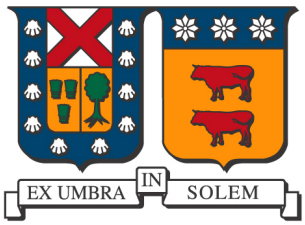
UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA
VALPARAÍSO - CHILE



"IMPLEMENTACIÓN E INTEGRACIÓN DE PROTOTIPO PARA LA DETECCIÓN DE GAS RADÓN"

RENATO ANDRÉS CASAS-CORDERO MENÉNDEZ

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRÓNICO MENCIÓN COMPUTADORES

PROFESOR GUÍA: **WERNER CREIXELL FUENTES**
PROFESOR CORREFERENTE: **SERGEY KULESHOV**

DICIEMBRE - 2016

A Gabriela, mi compañera de toda la vida, a mis hermanos Miguel, Cristina y Pilar, pero por sobre todo a mis padres, Renato y Cristina, quienes hicieron que esto e infinitas otras cosas fueran posibles.

AGRADECIMIENTOS

A ustedes padres, por la vida. Por el amor incondicional que me han entregado durante más de 28 años y la hermosa familia que formaron en el camino. Les agradezco por haber sido duros cuando debía escuchar un “no” y mis motivadores cuando quise volar, por guiarme en mis decisiones y apoyarme cuando eran contrarias a lo que hubiesen querido. Por estas y mil cosas más, gracias por ser mis padres.

A ti hermano, por ser mi compañero de infancia, mi complice de juventud y mi guía hacia la excelencia. Te extraño con toda mi razón, te recuerdo con toda mi esperanza y te siento con toda mi alma, en cada momento y en cada lugar.

A ustedes hermanas, por su apoyo, cariño y confianza. Cristi, nunca dejes que se apague esa luz, tarde o temprano te darás cuenta de que es todo lo que necesitas para lograr lo que quieras en esta vida. Pili, gracias por llenar la casa de alegría y conversaciones, estoy muy orgulloso de ti. Espero que descubras pronto la increíble persona y potencial que llevas dentro. ¡Rían, luchen y sueñen!

A mis abuelas, por ser una fuente inagotable de amor y enseñanzas. Gracias abuela Margarita, fuiste una madre, una confidente y un símbolo de cariño y sencillez durante los 27 años que compartiste a mi lado, siempre en el momento indicado, cada vez que te necesité. A mi abuela Yuyu, te agradezco la transparencia, rectitud y fuerza con la que has actuado en tu vida y sabido transmitir a quienes te rodean, has logrado ser un ejemplo de fortaleza en nuestra familia. A ambas mis más sinceras gracias por los increíbles hijos que formaron.

A mi madrina, Pilar, por el infinito y desinteresado cariño desde pequeño, por cada carta, abrazo y beso, siempre una alegría.

A mis tíos y primos, mi gran familia, por todos los momentos que hemos compartido juntos, por ser siempre una fuente de apoyo y felicidad. Sólo espero que a

pesar de las dificultades que presenta la vida, nunca olvidemos la alegría de cuando estamos juntos, es ese recuerdo el que nos mantendrá unidos por siempre.

A mis más cercanos amigos y compañeros, por las inagotables mañanas, tardes y noches, de proyectos, risas, vivencias, juerga, viajes, deporte y estudio. Cada uno de esos momentos compartidos junto a ustedes, cimentaron parte de lo que soy este día.

A la familia de mi mujer, parte de mi familia en este momento, por la confianza y cariño que recibí desde el primer día que entré en su casa, por las risas, paseos, vacaciones, comidas y conversaciones. Sepan que son privilegiados de lo que han construido.

Al equipo de promoción de la Universidad, por la calidad humana que se vive en cada uno de ustedes y por haberme ayudado a crecer enormemente durante los años que los acompañé.

A mis profesores, quienes desde el primer día en la Universidad abrieron mi mente y me enseñaron a caminar en lo nuevo e inexplorado. Por la pasión con la que realizan esta labor, en especial y con afecto a Mario Salgado, Agustín Gonzalez y Milan Derpich, por que siento que lograron traspasar la teoría y dejar un conocimiento aun mayor que el que hubiese podido hallar en cualquier libro.

Al equipo del CCTVAL, por todo el apoyo y conocimiento que compartieron durante los largos meses en que desarrollé esta memoria, en especial a David, Orlando, Rimsky, Francisco y Victor.

A Werner Creixell y Sergey Kuleshov, mi profesor guía y correferente en esta memoria, por alentarme a perfeccionar mi trabajo y ser un apoyo en el desarrollo del tema.

En último lugar, pero con lo más profundo de mi corazón, a mi mujer, a mi compañera y mejor amiga, a ti Gabriela, por dejarme compartir los momentos más

importantes de la vida a tu lado, por enseñarme a amar, por crecer conmigo y por darme la felicidad de formar una familia juntos. Te doy mil veces gracias por todo lo que me has dado y te pido mil veces perdón por lo que pude haber hecho y voy a hacer mal. Te agradezco por las hermosas cosas que vienen y por que, pase lo que pase, lo vamos a enfrentar juntos con el amor que nos ha unido más de 12 años.

RESUMEN

El radón es un elemento químico, radiactivo en origen natural producto de la desintegración del radio (Ra). Su isótopo más estable, ^{222}Rn, tiene una vida media de 3,8 días, tiempo luego del cual decae en polonio (Po). Es además el único gas en condiciones normales que sólo tiene isótopos radiactivos, motivo por el cual es considerado un peligro para la salud debido a su radiactividad. A raíz de esto es que se fabrica un prototipo capaz de obtener datos en tiempo real de la concentración de radón en el ambiente.

El prototipo mide la emisión de partículas alfa producto del decaimiento del gas mediante la utilización de un calorímetro *Shashlik*, que utiliza 223 placas (0.8·38·38[mm]) de plástico centellador espaciadas con aire entre ellas, las que producen destellos de luz al ser impactadas por radiación alfa. Estos destellos, de unos pocos fotones, son recolectados por fibras WLS (*Wave-Lenght Shifting*) que transportan la luz hacia los extremos del detector, donde se encuentran los MPPC (*Multi Pixel Photon Counters*), pixeles foto multiplicadores de reducido tamaño (3·3 [mm]) que transforman los fotones en pulsos de corriente.

El detector es sensible a diferentes fuentes ambientales de la radiación, siendo los rayos cósmicos su principal señal de fondo. Con el fin de distinguir si la partícula detectada es una partícula alfa o un rayo cósmico, un conjunto de 3 detectores secundarios adicionales provistos de la misma tecnología pero aislados de aire, y por lo tanto de gas radón, son distribuidos al rededor del detector principal. De este modo, la coincidencia entre los detectores se puede utilizar para excluir a los rayos cósmicos de las mediciones.

Palabras claves: Medición de radón, MPPC, plástico centellador.

ABSTRACT

Radon is a chemical element, radioactive in natural origin product of the disintegration of the radius (Ra). Its more stable isotope, ^{222}Rn, has a half-life of 3.8 days, after which it decays in polonium (Po). It is also the only gas under normal conditions that only has radioactive isotopes, which is why it is considered a health hazard due to its radioactivity. As a result, a prototype capable of obtaining real-time data of radon concentration in the environment is produced.

The prototype measures the emission of alpha particles from the decay of the gas by using a Shashlik calorimeter, which uses 223 plates (0.8·38·38 [mm]) of scintillating plastic spaced with air between them, which produce flashes of light when is impacted by alpha radiation. These flashes, of a few photons, are collected by WLS (*Wave-Lenght Shifting*) fibers that carry the light towards the ends of the detector, where the MPPC (Multi Pixel Photon Counters), with a tiny dimensions of 3·3 [mm], transform the photons into current pulses.

The detector is sensitive to different environmental sources of radiation, cosmic rays being its main signal. In order to distinguish whether the detected particle is an alpha particle or a cosmic ray, a set of 3 additional secondary detectors, provided with the same technology but isolated from air, and therefore of radon gas, are distributed around the principal detector. In this way, the coincidence between the detectors can be used to exclude the cosmic rays from the measurements.

Keywords: Radon measurement, MPPC, plastic scintillator.

GLOSARIO

MPPC - *Multi Pixel Photon Counter*, es un dispositivo de recuento de fotones usando múltiples píxeles APD.

APD - *Avalanche Photo Diode*, es un dispositivo electrónico semiconductor de alta sensibilidad que explota el efecto fotoeléctrico para convertir la luz en electricidad.

WLS - *Wavelenght Shifting*, es un material que absorbe fotones de frecuencia más altos y emite fotones de baja frecuencia. En la mayoría de los casos, el material absorbe un fotón, y emite múltiples fotones de baja energía.

WCVM - *Cockroft Walton Voltage Multiplier*, o multiplicador de tensión, es un circuito eléctrico que genera una alta tensión DC a la salida a partir de una tensión inferior de CA en la entrada.

DARK RATE - Es la tasa promedio de cuentas registradas sin ningún tipo de luz incidente.

CROSS TALK - Es un efecto que se produce cuando una avalancha de carga en algún pixel del MPPC, genera fotones con energía suficiente como para iniciar una avalancha correlacionada en los pixeles vecinos.

BREAKDOWN VOLTAGE (V_{BR}) - Es el voltaje mínimo que hace que una parte de un aislante se vuelva eléctricamente conductora.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN **V**

ABSTRACT **VI**

CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN **1**

CAPÍTULO 2 - ESTADO DEL ARTE **3**

2.1 Descripción general 3

2.2 Dispositivos comerciales 3

2.2.1 Equipos de tiempo real (Activos) 4

2.2.2 Equipos de corto y largo plazo (Pasivos) 6

2.2.3 Equipos emisores de alarma 9

2.3 Comparación de los dispositivos 11

2.4 Costos del Prototipo a desarrollar 14

CAPÍTULO 3 - MARCO TEÓRICO **16**

3.1 Descripción general 16

3.2 Multi Pixel Photon Counter (MPPC) 16

3.2.1 Fuentes de ruido 20

3.2.1.1 Afterpulse 20

3.2.1.2 Dark Count 21

3.2.1.3 Temperatura 23

3.2.1.4 Crosstalk 24

3.2.2 Photon Detection Efficiency (PDE) 24

CAPÍTULO 4 - DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL HARDWARE **26**

4.1 Descripción general 26

4.2 Multiplicador de Voltaje 27

4.2.1 Diseño Esquemático 29

4.2.2 Diseño PCB 33

4.3 Amplificador de Carga 34

4.3.1 Diseño Esquemático 34
4.3.2 Diseño PCB 38
4.3.3 Mediciones y ajustes 39
4.4 Regulador de Voltaje 42
4.4.1 Diseño Esquemático 42
4.4.2 Diseño PCB 44
3.4.3 Mediciones y ajustes 45
CPAÍTULO 5 - DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO 46
5.1 Descripción general 46
5.2 Multi Pixel Photon Counters (MPPC) 50
5.3 Guías de Luz 51
5.3.1 Diseño 3D 51
5.3.2 Confección y Armado 52
5.4 Tapas exteriores 52
5.4.1 Diseño 3D 53
5.4.2 Confección y Armado 53
5.5 Contenedor 54
5.5.1 Diseño 3D 55
5.5.2 Confección y Armado 55
5.6 Sistema de Ventilación Detector Principal 55
5.6.1 Bomba de Aire 56
CAPÍTULO 6 - RESULTADOS EXPERIMENTALES 57
6.1 Descripción general 57
6.2 Calibración 57
6.3 Introducción Artificial de Partículas Alfa (Pasos Siguientes) 66
CAPÍTULO 7 - CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO 67
REFERENCIAS 69
ANEXO A - RADIACTIVIDAD 72
Actividad Radioactiva 76

Dosis Absorbida 77
Dosis Equivalente 77
ANEXO B - GAS RADÓN **79**
Hábitat natural del Radón 80
Efectos adversos producto de la inhalación de gas Radón 81
Normativas de exposición a la radiación 84
Normativas en Chile 84
Normativas vigentes en el Mundo 85

CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN

El radón es un gas radiactivo natural, sin olor, color o sabor que se produce a partir de un proceso de desintegración radiactivo del elemento Radio *[1]*. Estos elementos preceden de una cadena de descomposición, donde se puede ubicar al Uranio como padre de ésta *[2]*. Éste último es posible encontrarlo en todas las rocas y suelos e incluso en el agua, aunque muchas veces en concentraciones muy bajas, cercanas a las cien partes por millón *[3,7]*.

El radón se escapa fácilmente por la roca fracturada de la tierra hasta la cubierta del suelo, donde se descompone en Polonio, emitiendo partículas radiactivas en su proceso. A medida que respiramos, las partículas se depositan en las células que recubren las vías respiratorias, donde pueden dañar el ADN y potencialmente causar cáncer de pulmón *[4]*.

Al aire libre, el radón se diluye rápidamente en concentraciones muy bajas y generalmente no presenta un problema a la salud por su baja concentración, estando sus niveles[1] promedios entre los 5 y 15 Bq/m^3. Sin embargo, al interior de una edificación o lugares cerrados con poca ventilación como minas o cuevas, las concentraciones de radón son más altas. En ciertos hogares ha sido posible encontrar concentraciones de radón de hasta a 10.000 Bq/m^3, cantidad ciento de veces mayor a la que se encuentra normalmente en espacios abiertos *[5]*.

En términos de salud, el radón es la causa más importante de cáncer de pulmón después del consumo de cigarro. Se estima que el radón causa entre 3% y 14% de todos los cánceres de pulmón, dependiendo del nivel promedio de radón del país en cuestión *[4, 11]*. La exposición y la probabilidad de aparición de cáncer presentan una

[1] La radiactividad se mide en unidades llamadas Becquerel (Bq). Un Becquerel corresponde a la transformación (desintegración) de un núcleo atómico por segundo. La concentración de radón en el aire se mide por el número de desintegraciones por segundo en un metro cúbico de aire (Bq/m^3).

relación lineal, es decir, el riesgo de cáncer de pulmón aumenta directamente con el aumento de la exposición al radón.

En muchos países de Europa y en Estados Unidos, la inclusión de medidas de protección en edificios nuevos se ha convertido en una medida de rutina y en algunos países, un procedimiento obligatorio. Los sistemas pasivos de mitigación, como ventiladores, han demostrado ser capaces de reducir los niveles de radón en el interior en un 50% o más *[11]*.

Por otro lado, existen ciertas hipótesis que indican la relación que podría existir entre el aumento del gas Radón en algunas zonas previo a eventos sísmicos. En otras palabras se considera que podría existir alguna correlación entre ambos eventos, que sugiera la posibilidad de predicción *[6]*.

A finales de 1960 y principios de 1970 informes de Rusia y China indicaban que las concentraciones de gas radón en la tierra aparentemente cambiaban antes de la ocurrencia de terremotos cercanos. Esto estimuló una serie de experimentos en otras partes del mundo para monitorear el radón y asociar sus cambios a la existencia de eventos sísmicos *[7]*. Producto de que se detectaron emisiones del gas sin presencia de sismos y viceversa, o sea, sismos sin lecturas de gas radón, el interés en esta investigación se desplomó, hasta que en el año 2009, el científico italiano Giampolo Giuliani, que llevaba tiempo investigando a través de esta teoría, predijo un inminente terremoto que se produciría en Aquila (Italia) semanas antes que sucediera *[8, 10]*. En ese año, la NASA seguía investigando esta hipótesis como una posible herramienta en la predicción de sismos *[9]*.

En base a lo anteriormente expuesto y haciendo uso de tecnología de vanguardia, la implementación e integración de un prototipo para la detección de gas radón tiene dos áreas de interés que serán desarrolladas en trabajos posteriores a la confección éste.

CAPÍTULO 2 - ESTADO DEL ARTE

2.1 Descripción general

Se realiza un catastro de las tecnologías existentes en la actualidad que tienen relación a la detección de gas Radón. El propósito es exponer los dispositivos existentes en el mercado y de qué modo el detector desarrollado se diferencia de estos, analizando aspectos relevantes tales como movilidad, precisión de la muestra, velocidad de muestreo, posibilidad de configuración, método de medición y costos asociados. Para concluir, se realiza un cuadro comparativo con las características de interés.

2.2 Dispositivos comerciales

Los detectores comerciales se han subdividido en 3 áreas de interés, donde el principal diferenciador o clasificador es el tiempo que demora un equipo entre que comienza a medir y el usuario obtiene las mediciones. Dicho lo anterior, los tres tipos comerciales son:

- Equipos de tiempo real (Activos), entregan en general los resultados en plazos de unas pocas horas o pueden incluso estar monitoreando en tiempo real la concentración presente en el ambiente.
- Equipos de corto y largo plazo (pasivos), se destacan por ser de uso muy básico, ya que el usuario sólo debe desplegar el equipo en alguna zona de interés para las mediciones durante un tiempo prolongado de algunas semanas y luego es analizado por empresas especializadas.
- Equipos emisores de alarma, tienen la particularidad de que en vez de señalar la concentración de gas presente en un ambiente, emiten una alarma cuando los valores de radón superan un valor pre establecido. En ningún caso despliegan la información al usuario.

2.2.1 Equipos de tiempo real (Activos)

Los métodos de monitoreo activos, en general más caros que los pasivos, requieren estar conectado a la corriente eléctrica o funcionan con baterías por períodos acotados y proporcionan una lectura instantánea de los niveles de radón en un momento dado. Algunos productos pueden calcular los niveles de radón a corto y largo plazo, además de la medición en tiempo real, entregando así un análisis estadístico (de las concentraciones) en un plazo de tiempo predefinido.

A. Tiempo real - RAD7 *[12]*

Es uno de los dispositivos más completos del mercado, ya que es capaz (con otros accesorios) de medir la concentración de radón tanto en el aire como en depósitos de agua u otros líquidos. Incluye una conectividad mediante puerto RS-232, bluetooth y USB, desde donde se puede realizar la descarga de información a un PC. Su medición más rápida tarda 2 horas y responde con una desviación estándar, según el fabricante, de un 10%.



Figura 2.1: Imagen del Detector RAD7

FUENTE: WEB, http://www.durridge.com/products_rad7.shtml

B. Tiempo real - Corentium *[13]*

Este dispositivo toma muestras de aire a través de una cámara de difusión pasiva, utilizando espectrometría alfa para calcular el nivel de radón. Para esto utiliza fotodiodos de silicio tanto para contar como para medir la energía de las partículas alfa resultantes de la cadena de desintegración de gas radón.

Además, está provisto de un software que permite descargar todos los datos desde el sensor a un PC, generando informes gráficos personalizados. Al mismo tiempo permite conectarlo a un smartphone a través de Bluetooth mediante aplicaciones para dispositivos iOS y Android y obtener gráficos de las mediciones tomadas.

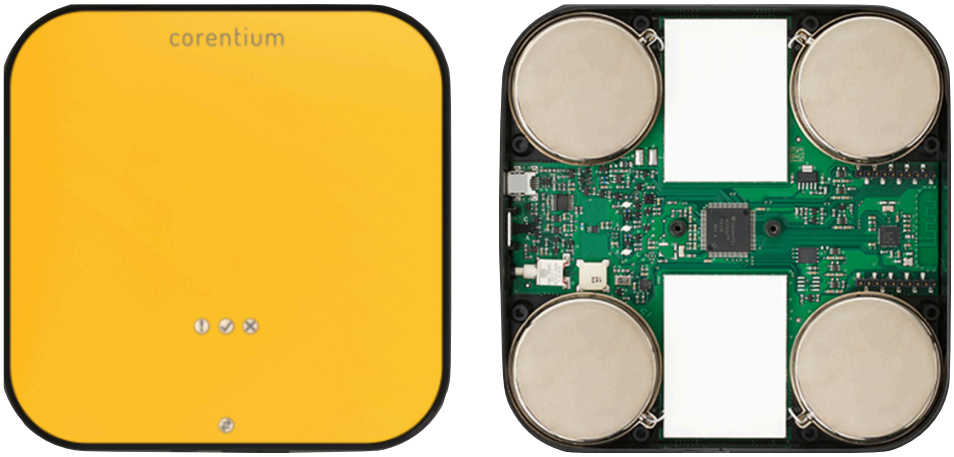


Figura 2.2: Imagen del Detector Corentium

FUENTE: WEB, https://www.corentium.ca/ca_en/compare-models/

C. Tiempo real - RStone *[14]*

Se caracteriza por su reducido tamaño e interfaz de usuario, la que permite comunicarse a distancia (hasta 50 metros) para programar el equipo o configurar y obtener mediciones inalámbricas. Además, se puede configurar para realizar el envío de las mediciones a través de SMS, permitiendo

obtener las mediciones en cualquier zona, incluso donde las concentraciones de radón podrían afectar a la salud por niveles excesivos del gas.

Se puede configurar para tomar mediciones de una hora o más, según necesidad del usuario. Una batería interna garantiza un funcionamiento por un plazo de 15 días sin necesidad de conectar a la corriente.



Figura 2.3: Imagen del Detector RStone

FUENTE: WEB, http://www.rsens.it/en/products/

2.2.2 Equipos de corto y largo plazo (Pasivos)

Son la forma más simple de monitoreo para el usuario, ya que los dispositivos se colocan en alguna superficie por un tiempo determinado y luego son sellados y enviados a laboratorios para su análisis. Las pruebas donde los equipos miden durante menos de 90 días se clasifican de corto plazo, mientras que las que superan esta cantidad temporal se clasifican como de largo plazo.

Debido a que los niveles de radón tienden a fluctuar día a día y en función de las estaciones del año, los equipos de corto plazo no pueden ser indicadores de la cantidad promedio de radón anual. Para esto se implementan los dispositivos de largo plazo, ya que compensan las fluctuaciones que pueden ocurrir producto de cambios de estaciones y diferencias climáticas asociadas, entregando un media más realista de la zona de medición.

El modo de operación de estos equipos de bajo costo se basa en el principio de impacto entre las partículas alfa liberadas por el radón y el choque que producen en

un material de aluminio que se encuentra al interior de los equipos. Al depositar su energía en la placa de aluminio se producen perforaciones microscópicas, las cuales al momento de ser analizadas en laboratorio son ampliadas mediante procesos químicos y luego enumeradas con sistemas automatizados, existiendo una correlación entre los orificios realizados y la concentración promedio de gas radón por el tiempo en el cual el dispositivo estuvo expuesto.

A. Corto Plazo - Empresas PRO LAB & First Alert *[15]*

Ambas empresas son referentes en el mercado de Estados Unidos en los equipos de detección de corto plazo. Los kits presentes en la figura 2.4 representan soluciones de medición mediante exposición de 48 horas, tiempo luego del cual deben ser enviadas a laboratorios para su revisión y posteriores resultados, los cuales pueden tardar hasta 15 días en algunos casos.



Figura 2.4: Imagen de los Detectores PRO LAB y First Alert

FUENTE: WEB, https://www.lowes.com/pd/PRO-LAB-Radon-Gas-Test-Kit/4070097

B. Largo Plazo - Modelo Alpha Track *[16]*

Presenta una opción fácil económica y fiable. El inconveniente con este tipo de detectores es el desfase en obtener las mediciones. La figura 2.5 muestra al equipo "Alpha Track" de la marca RSSI, el cual tiene la particularidad de poder realizar ensayos de medición en períodos de entre 8 días hasta un año según los requerimientos de quien lo emplea. Al igual que todos los dispositivos de medición pasivo, los resultados promedios obtenidos no son entregados sino hasta después de pasar por un proceso de análisis en los laboratorios provistos para tal tarea.



Figura 2.5: Imagen del Detector Alpha Track

FUENTE: WEB, http://www.rssi.us/radon-alpha-track-radon-detector.htm

C. Corto/Largo Plazo - SafetySiren ProSeries 3 *[17]*

Este dispositivo debe ser utilizado como un sustituto de la realización de una prueba de radón convencional. El dispositivo es adecuado para medir los niveles de radón sólo después de que una evaluación inicial se ha realizado utilizando los kits de pruebas convencionales ya que no hay manera de

asegurar que el dispositivo está funcionando correctamente sin este tipo de controles cruzados.

La lectura digital muestra el nivel real de radón en el hogar en pCi/L en modalidad de corto (7 días) y largo plazo (desde que se conecta por primera vez). Una alarma sonora se activa si la medición a largo plazo alcanza 4.0 pCi/L o si la medición a corto plazo se mantiene por encima de 4,0 pCi/L durante 30 días consecutivos.



Figura 2.6: Imagen del Detector ProSeries 3

FUENTE: WEB, http://www.radonzone.com/radon-detector.html

2.2.3 Equipos emisores de alarma

Se les conoce como equipos de alerta, ya que no entregan ningún tipo de información sobre la concentración de gas radón, salvo la emisión de sirenas, alarmas y/o activación de sistemas de ventilación en el caso de superarse un determinado umbral de bq/m^3.

A. Modelo Victoria *[18]*

Es un producto diseñado exclusivamente para detectar niveles de radón superiores a los 200[bq/m^3], emitiendo una alarma sonora y visual cuando esto se cumple. A diferencia de las opciones a corto y largo plazo, no presenta ningún tipo de análisis de los datos como promedio por unidad de tiempo o posibilidad de exportar gráficos.



Figura 2.7: Imagen del Detector Victoria

FUENTE: WEB, http://radoncorp.com/testing/victoria-radon-alarm.php

B. Modelo Radostat *[19]*

Es un producto similar al anterior, con la particularidad de que se complementa con un ventilador o sistema de ventilación, mediante la activación de un relé interno, el cual hace circular el aire de un entorno cerrado hacia el exterior (espacio abierto). Su nivel de activación está configurado para los 150[bq/m^3].



Figura 2.8: Imagen del Detector Radostat

FUENTE: WEB, http://radoncorp.com/pdf/brochureAYKOWproductsweb.pdf

2.3 Comparación de los dispositivos

Se realiza una descripción de cada una de las áreas a analizar, donde sus ítems son descritos en 3 niveles: Alto, Medio o Bajo, según la descripción realizada para cada uno de los criterios de comparación.

Movilidad:

- Alta: Es posible utilizar el equipo en cualquier tipo de entorno sin necesidad de estar conectado directamente a la corriente eléctrica (mediante uso de baterías). Cuanta también con un software que permita configurar el equipo u obtener las mediciones de forma remota o inalámbrica.
- Media: Cumple con las características de una movilidad alta salvo por la opción de ser utilizado con baterías o contar con un software de operación a distancia.
- Baja: Debe estar constantemente conectado a la corriente eléctrica y tiene rangos de operación (temperatura y humedad) muy acotados.

Precisión:

- Alta: Presenta una desviación estándar en las mediciones inferior al 10%.
- Media: Presenta una desviación estándar en las mediciones entre el 11% y el 20%.
- Baja: Presenta una desviación estándar en las mediciones superior al 21%.

Velocidad de Muestreo:

- Alta: Es capaz de entregar valores de la concentración de gas radón en el ambiente en períodos menores a las 6 horas.

- Media: Es capaz de entregar valores de la concentración de gas radón en el ambiente en un rango mayor a 6 horas, pero menor a 24 horas.
- Baja, aquellos dispositivos que no son capaces de entregar mediciones de la concentración del gas radón en tiempos inferiores a un día (24 horas).

Configuración:

- Alta: Permite acceso total al dispositivo mediante un libre acceso y disposición tanto del software como del hardware mediante hojas de datos explicativas de la tecnología utilizada.
- Media: Tiene la posibilidad de implementar accesorios que aumenten las capacidades de medición o permitan una manipulación del equipo mediante software para optimizar parámetros o implementaciones personales.
- Baja: No es posible ser configurado en ninguno de los siguientes aspectos: alarmas dependiendo de las concentraciones de gas radón y conexión a dispositivos móviles o computadores.

Método de Medición:

- Detector de Silicio (*Ion-Implanted*): Un detector silicio es recubierto por unas barreras superficiales, dopadas con ciertos elementos que garantizan un bloqueo de partículas con un rango energético (MeV) menor que el deseado. Una vez que la partícula es lo suficientemente energética como para atravesar las barreras superficiales, entra en contacto con el detector que genera una corriente eléctrica.
- Laboratorio: Las muestras tomadas deben ser enviadas a un laboratorio para ser examinadas. En general se hace con uso de microscopios ya que las muestras dejan diminutas marcas en el detector al ser impactadas por radiación alfa producto del decaimiento del gas radón.

- Cámara de Ionización: Se utiliza en aquellos detectores que recogen todas las cargas creadas por ionización directa dentro del gas a través de la aplicación de un campo eléctrico. Sólo utiliza las cargas discretas creadas por cada interacción entre la radiación incidente y el gas, y no implica los mecanismos de multiplicación de gases utilizados por otros instrumentos de radiación, como el contador *Geiger-Müller* o el contador proporcional.
- Fotodiodos: A través de una cámara de difusión pasiva y mediante espectrometría alfa, el radón se detecta utilizando fotodiodos de silicio para contar y medir la energía de las partículas alfa resultantes de la cadena de decaimiento del gas radón.

	RAD7 [A]	**Corentium [B]**	**RStone [C]**
Movilidad	Alta	Alta	Alta
Precisión	Alta	Alta	Alta
Velocidad Muestreo	Alta	Alta	Alta
Configuración	Media	Baja	Baja
Método de Medición	Detector de Silicio	Fotodiodos	-
Costos Asociados	CLP 4,614,290	CLP 1,266,300	CLP 1,347,390

Figura 2.9: Tabla Comparativa Detectores Activos

	PRO Lab [A]	**Alpha Track [B]**	**ProSeries 3 [C]**
Movilidad	Media	Media	Baja
Precisión	Media	Media	Media
Velocidad Muestreo	Baja	Baja	Media
Configuración	Baja	Baja	Baja
Método de Medición	Laboratorio	Laboratorio	Cámara de Ionización
Costos Asociados	CLP 6,700	CLP 16,750	CLP 87,100

Figura 2.10: Tabla Comparativa Detectores Pasivos

	Victoria [A]	Radostat [B]
Movilidad	Media	Baja
Precisión	-	-
Velocidad Muestreo	Baja	Baja
Configuración	Baja	Baja
Método de Medición	Cámara de Ionización	Cámara de Ionización
Costos Asociados	CLP 134,000	CLP 201,000

Figura 2.11: Tabla Comparativa Detectores de Alarma

2.4 Costos del Prototipo a desarrollar

Se presenta a continuación una tabla con los costos asociados al prototipo que se desarrolla en el presente trabajo de titulación, aunque los especificaciones técnicas serán comentadas y detalladas en los capítulos venideros. A modo de contraste se concluirá en el capítulo 7 sobre las ventajas que presenta un detector de estas características frente a lo que ofrece actualmente el mercado nacional e internacional.

ITEM	CANTIDAD	PRECIO TOTAL
Plástico Centellador Detector Principal (3,9[cm]·3,9[cm]·0,3[cm])	223 [units]	CLP 435,000
Plástico Centellador Detector Inferior (90[cm]·5[cm]·2[cm])	1 [unit]	CLP 388,000
Plástico Centellador Detectores Laterales (90[cm]·7[cm]·2[cm])	2 [units]	CLP 911,000
Fibras Ópticas (16 fibras en cada detector, 64 en total)	100 [m]	CLP 160,000
Guías de Luz	8 [units]	CLP 40,000
Electrónica - Multiplicador de Voltaje (Azul)	8 [units]	CLP 13,600
Electrónica - Amplificador de Corriente (Verde)	8 [units]	CLP 13,600

MPPC	8 [units]	CLP	400,000
Estructura Metálica Exterior	~	CLP	20,000
Otros (Pintura, Sellante, Pegamento, Bomba de Aire, etc…)	~	CLP	100,000
PRECIO TOTAL ESTIMADO		**CLP**	**2,481,200**

Figura 2.12: Tabla de Costos asociados al Prototipo

CAPÍTULO 3 - MARCO TEÓRICO

3.1 Descripción general

El presente capítulo profundiza en los MPPC, hardware clave en el desarrollo de este prototipo y principal mejora con respecto a prototipos anteriores. El resto de conceptos, también de vital importancia pero con menor carácter novedoso como el gas radón, la radiactividad y las fibras ópticas, entre otros, son detalladas en los anexos del presente documento.

3.2 Multi Pixel Photon Counter (MPPC)

Los MPPC son dispositivos de la familia de los fotomultiplicadores de silicio y su principal función es el recuento de fotones, utilizando múltiples pixeles en fotodiodo de avalancha (modo *Geiger*). Este modo considera que un fotón o señal portadora de fotones puede desencadenar una corriente de avalancha debido al mecanismo de ionización de impacto, pudiendo detectar señales de baja intensidad (hasta un único fotón gracias a su alta ganancia) con tiempos de llegada en fluctuaciones de pocos picosegundos. La ganancia, con valores típicos superiores a 10^5, hace referencia a la cantidad de electrones emitidos en una avalancha por cada fotón que es absorbido por un pixel *[20]*.

Su estructura geométrica bi-dimensional, permite generar una configuración donde cada pixel es una conexión en serie de un fotodiodo de avalancha (APD) con una resistencia R_Q.

La configuración en la figura 3.1 muestra un arreglo de MPPC junto al circuito equivalente interno de un MPPC (figura 3.2). Como se puede apreciar, todos los MPPC cuentan con un switch, que puede estar ON/OFF, siendo OFF su estado por defecto cuando existe ausencia de luz y no se considera el efecto de *dark count* (visto en la sección 3.2.1.2).

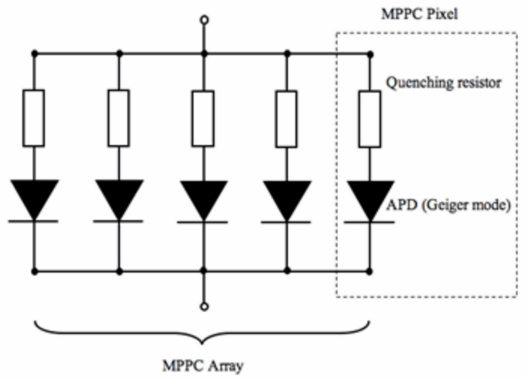


Figura 3.1: Arreglo de MPPC

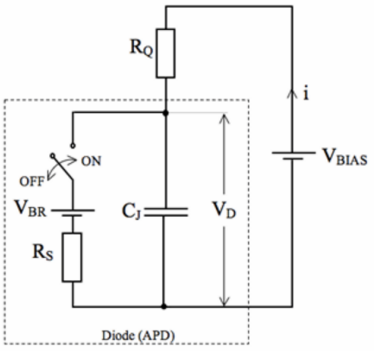


Figura 3.2: Circuito de un pixel (MPPC)

Como se menciona, la figura 3.2 representa un circuito equivalente a un solo pixel del MPPC bajo condiciones de polarización, en el cual, para operar en modo *Geiger*, es necesario cumplir $V_{BIAS} > V_{BR}$ (*Breakdown Voltage*). En serie con el APD y V_{BIAS} se encuentra R_Q, cuyo valor es aproximado a los 150[kΩ].

Al estar el switch en modo OFF, cada APD se encuentra en estado *"READY"* y su tensión (V_D) es V_{BIAS} puesto que el circuito se reduce a una fuente en serie con una resistencia y un condensador, generando que este último se cargue al valor de la fuente (V_{BIAS}). Este estado será permanente hasta que se introduzca una inyección de carga (APD absorbe un fotón), cambiando el estado del switch a ON, instante en el que C_J comenzará a descargarse a través de la resistencia R_S al tener $R_Q >> R_S$. Los valores típicos de R_S y C_J son 1[kΩ] y 0.1[pF] respectivamente, por lo tanto el voltaje de descarga de C_J se acerca a V_{BR} con una constante de tiempo $\tau \sim R_S C_J$ (100[pS]) *[21]*.

La figura 3.3 representa esquemáticamente la corriente en función del tiempo, cuando un pixel del MPPC entra y se recupera de una avalancha.

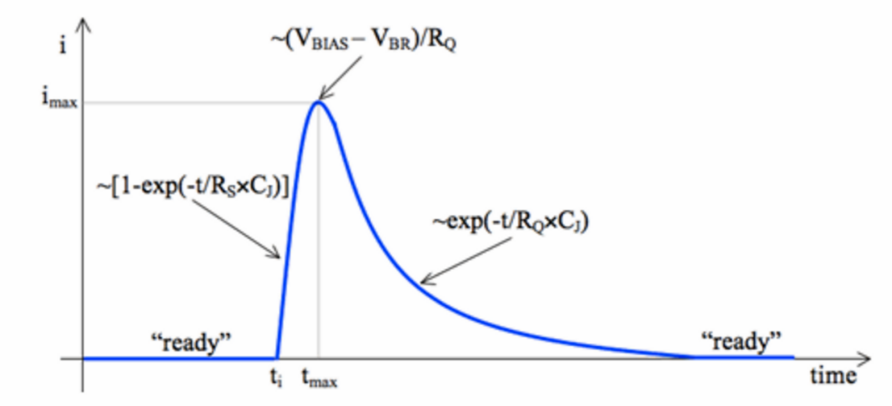


Figura 3.3: Pulso de corriente generado por un pixel (MPPC)

Una inyección de carga en la región de avalancha se produce en el tiempo ti. En ese instante C_J comienza a descargarse, generando un decrecimiento de V_D y un incremento de i(t). La corriente i(t) tiende a i_{max} (ecuación 3.1) en el tiempo t_{max}, momento en que la avalancha es apagada (switch OFF).

$$i(t) \sim i_{max}\left[1 - exp\left(\frac{-t}{R_S} \cdot C_J\right)\right] \qquad \text{(ec 3.1)}$$

Para tiempos posteriores a t_{max}, C_J se descarga a través de R_Q y la corriente disminuye de la forma exponencial que se muestra en la figura 3.3. Producto de que $R_SC_J << R_QC_J$, la corriente se eleva más abruptamente antes de t_{max} en relación a la descarga posterior a éste. Esto le da la forma asimétrica característica al pulso de corriente generado.

$$V_D = V_{BIAS} - \frac{R_Q(V_{BIAS} - V_{BR})}{R_Q + R_S} = V_{BIAS} - \frac{\Delta V}{\left(1 + \frac{R_S}{R_Q}\right)} \qquad \text{(ec 3.2)}$$

Por ley de Kirchhoff, la tensión V_D durante el proceso de descarga se aproxima a un valor asintótico dado por la ecuación 3.2.

La figura 3.4 muestra las formas de onda (análoga a la que se ilustra esquemáticamente en la figura 3.3) producida por un MPPC en respuesta a la luz de baja intensidad. Las formas de onda etiquetados como 1 p.e representan que sólo un pixel ha sido disparado en respuesta a la luz.

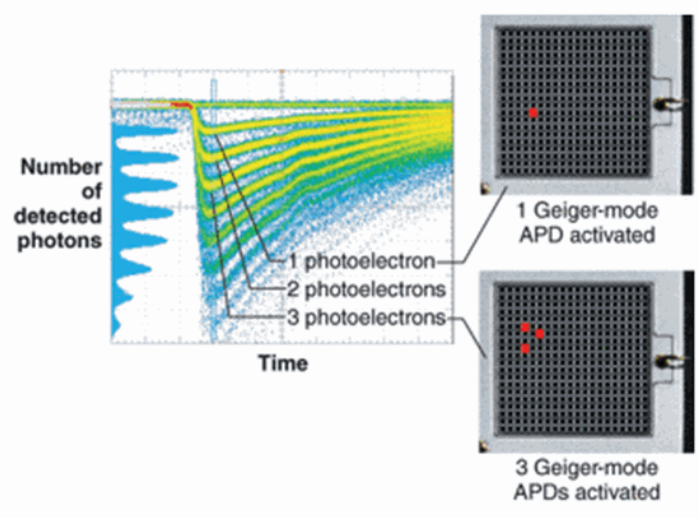


Figura 3.4: Forma de onda análoga para la medición de 3 fotoelectrones

Es importante tener en cuenta que si dos o más fotones impactan simultáneamente a un mismo pixel, la forma de onda de salida será la misma. Del mismo modo, las formas de onda etiquetadas con 2 p.e son la representación para dos pixeles que disparan simultáneamente, ya que la corriente que fluye a través de los terminales no es más que la suma de los pulsos de corriente generados en cada uno de éstos.

Para obtener estas formas de onda acumuladas, el osciloscopio se establece en el modo de persistencia; por lo tanto, el color de la figura corresponde a la frecuencia con la que se han producido los eventos. Existen 3 conceptos no deseados, que como se adelantaba en un comienzo, y serán vistos a continuación, pueden desencadenar una avalancha; *"dark count"*, *"afterpulse"* y *"cross-talk"*.

3.2.1 Fuentes de ruido[2]

Visto el funcionamiento del MPPC, es importante mencionar algunos conceptos fundamentales asociados a éste, tales como *afterpulse*, *dark count*, temperatura, *crosstalk* y *photon efficiency*, ya que pueden provocar fenómenos que afecten a las mediciones, dificultando en algunos casos tener certeza de los datos obtenidos. Si el nivel generado por estas fuentes de ruido es demasiado alto, entonces puede también invadir el nivel de la señal deseada, haciendo que sea más difícil de distinguir.

Por lo anterior, es relevante saber cómo se comportan estos ruidos para lograr distinguirlos y separarlos o al menos disminuir su relación señal/ruido de las mediciones.

3.2.1.1 Afterpulse

Cuando un MPPC detecta fotones, la salida puede contener señales espurias que aparecen con un retraso de tiempo respecto de la inyección de luz al MPPC. Estas señales son denominadas "*afterpulses*" y se pueden ver reflejadas en la figura 3.5. Esto se produce luego de que generada la primera avalancha de carga, algunos portadores de carga pueden quedar atrapados por efecto de la red, los que podrían liberarse y desencadenar una avalancha secundaria correlacionada mientras el pixel se recupera de la primaria.

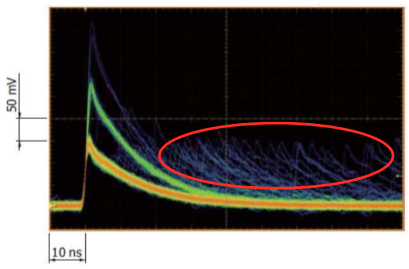


Figura 3.5: Efecto *afterpulse*

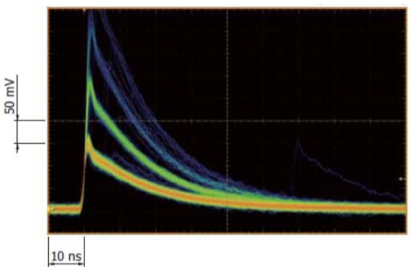


Figura 3.6: Reducción de *afterpulses*

[2] Los siguientes conceptos son referenciados y explicados desde los *datasheet* expuestos por el fabricante Hamamatsu. En la bibliografía es posible encontrar la documentación accediendo a la referencia *[21]*.

La reducción de estas señales trae diversos beneficios tales como una mejora S/N, un rango de voltaje de operación más amplio y una mejora en "*photon detection efficiency (PDE)*".

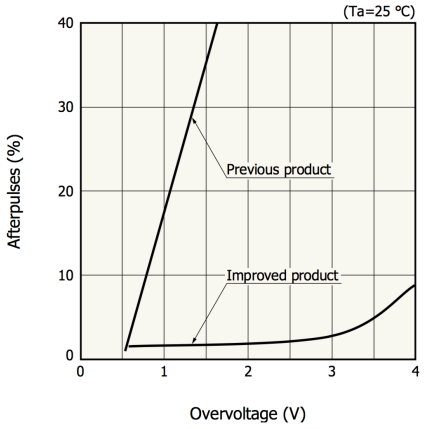


Figura 3.7: Gráfico Afterpulses vs Overvoltage

$$V_{OV} = V_{BIAS} - V_{BR} \qquad \text{(ec 3.3)}$$

En la figura 3.7, es posible apreciar que existe una directa relación de la probabilidad de obtener *afterpulses* a partir de la señal en función del *overvoltage* (definido en la ecuación 3.3) con el que se trabaja, siendo mayor la probabilidad al aumentar la señal de tensión.

3.2.1.2 Dark Count

Este concepto hace referencia al registro de cuentas sin el efecto de luz incidente, atribuibles a la generación de una avalancha de carga, producto de variaciones térmicas. Estos registros, que son pulsos de corriente, se denominan *dark pulse* y su generación es totalmente aleatoria, sin tener relación con los efectos de fotones incidentes. Estos pulsos no son distinguibles, en su forma, de los pulsos generados por efecto de fotones incidentes. La figura 3.8 muestra pulsos generados aleatoriamente en eventos no correlacionados con un pulso incidente de luz.

El número de *dark pulses* observados se conoce como *dark count* y el número de *dark pulses* por segundo se conoce como *dark count rate*, definida por el fabricante de Hamamatsu como el número de impulsos que se generan y superan un umbral de 0.5 foto electrones.

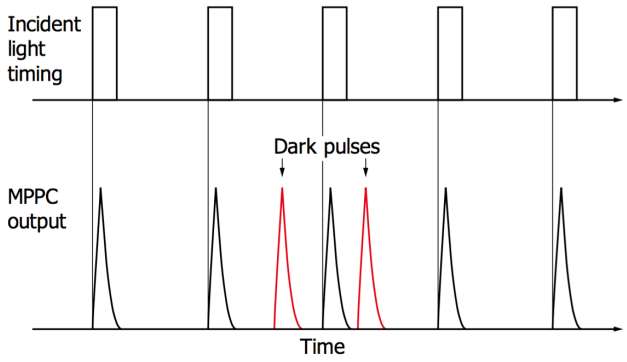


Figura 3.8: Gráfico RV[V] vs Tº

Existe una interesante correlación en algunos parámetros que tienen incidencia en las cuentas oscuras como lo es la temperatura, la cual es posible apreciar en la figura 3.9. Éste genera un aumento en la tasa de cuentas oscuras al aumentar su valor y por otro lado el *threashold*, el cual al aumentar su tensión en pocos milivolts logra disminuir considerablemente la tasa de *dark rate*, efecto que se muestra en la figura 3.10.

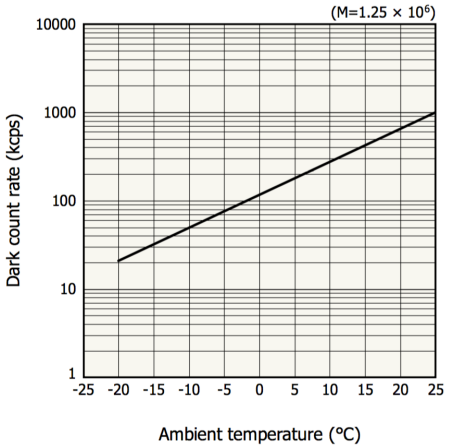


Figura 3.9: Gráfico DKR vs Tº

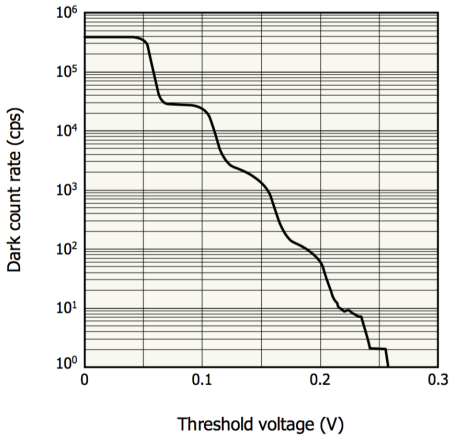


Figura 3.10: Gráfico DKR vs Threshold [V]

3.2.1.3 Temperatura

En un ambiente de temperatura controlada (constante), la sobretensión ($V_D = V_{BIAS}-V_{BR}$) aplicada a un MPPC determina sus características operacionales tales como el PDE y la ganancia. Debido a que la temperatura es un parámetro importante que afecta a las características opto-eléctricas, tales como la tensión de ruptura V_{BR}, la resistividad R_Q y la energía de intervalo de banda, es que el funcionamiento del MPPC puede verse fuertemente afectado por este parámetro. Para ilustrar esta dependencia, se muestran dos gráficos, entregados comúnmente por el fabricante según el modelo del MPPC, donde en la figura 3.11 se puede observar el ajuste de tensión VBIAS (*Reverse Voltage*)[3] necesario que debe realizarse cuando varía la temperatura si se desea mantener una ganancia constante, mientras que en la figura 3.12 es posible apreciar la relación entre la ganancia y la temperatura ambiente cuando V_{BIAS} tiene un valor fijo.

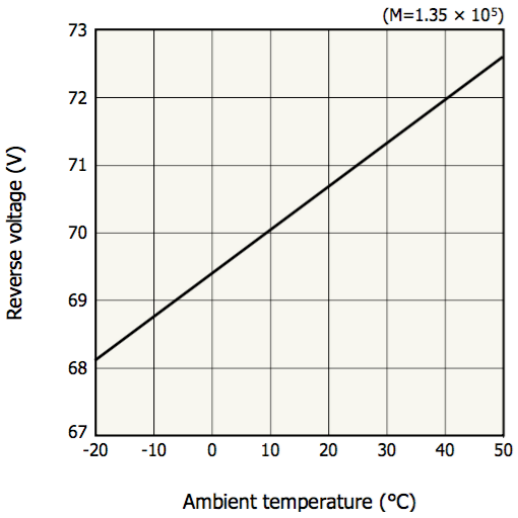


Figura 3.11: Gráfico RV[V] vs Tº

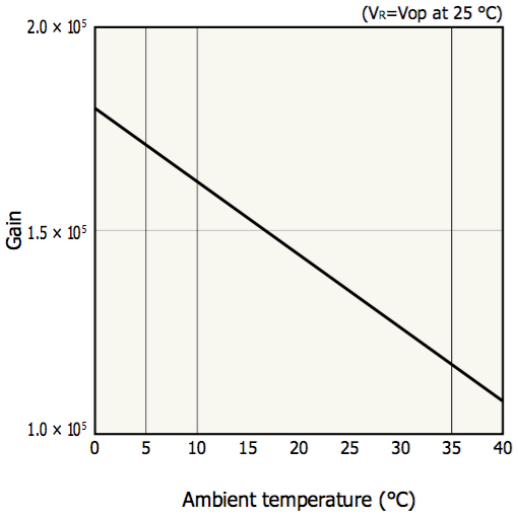


Figura 3.12: Gráfico Ganancia vs Tº

[3] En los *datasheet* de Hamamatsu (fabricante de los MPPC utilizados) se emplea el nombre de "*Reverse Voltage"* para referirse al voltaje V_{BIAS} en algunas ocasiones.

3.2.1.4 Crosstalk

Este efecto se produce cuando una avalancha de carga en algún pixel del MPPC, genera fotones con energía suficiente como para iniciar una avalancha correlacionada en los pixeles vecinos como se muestra en la figura 3.13.

Resulta interesante mencionar que la emisión de estos fotones es del tipo isotrópico, lo que genera una baja probabilidad de generar efecto *crosstalk*. Sin embargo algunos de estos fotones generados pueden ser absorbidos por el mismo pixel de donde fueron emitidos, causando posiblemente un *afterpulse* en dicho pixel.

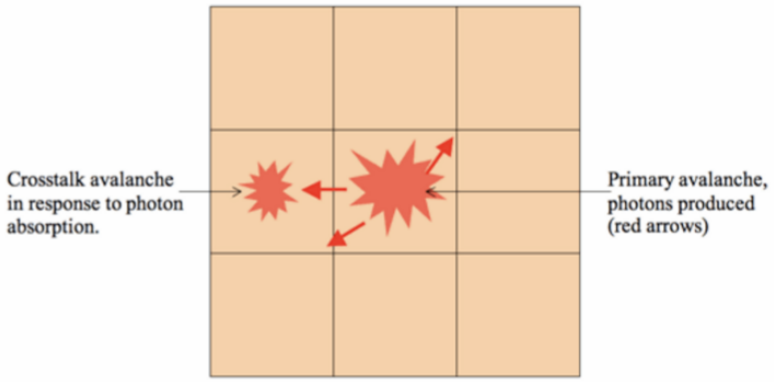


Figura 3.13: Efecto *crosstalk*

3.2.2 Photon Detection Efficiency (PDE)

Los MPPC utilizados tienen una sensibilidad máxima a una longitud de onda de entre 400-500[nm]. Esta sensibilidad se conoce como la eficiencia de detección de un fotón (PDE) según se muestra en la ecuación 3.4, como un indicador del porcentaje de fotones incidentes detectados.

$$PDE = \frac{Número\ \ fotones\ \ detectados}{Número\ \ fotones\ \ incidentes} \qquad \text{(ec. 3.4)}$$

El valor del PDE es siempre menor a 1 y depende de factores como el voltaje, la temperatura y la longitud de onda de los fotones incidentes.

Las figuras a continuación muestran la relación que existe entre el PDE y la longitud de onda de un fotón incidente o el V_{BIAS} de operación en un MPPC.

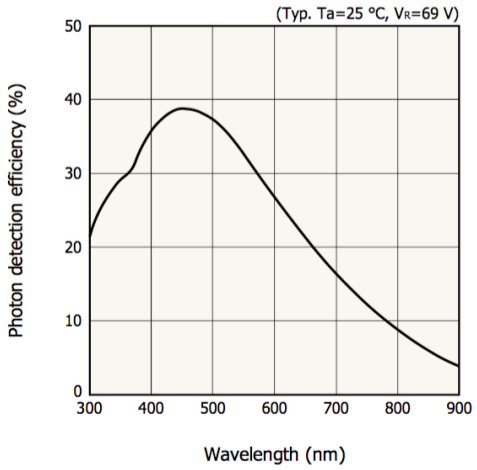


Figura 3.14: Gráfico PDE vs Longitud Onda

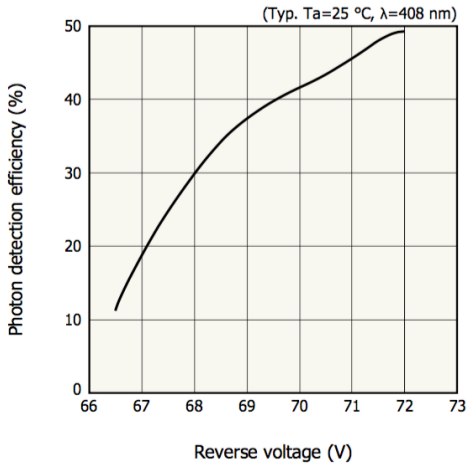


Figura 3.15: Gráfico PDE vs V_{BIAS}

CAPÍTULO 4 - DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL HARDWARE

4.1 Descripción general

El presente capítulo, muestra el diseño, integración y construcción del hardware a utilizar en el prototipo. En particular el diseño del multiplicador de tensión[4] y las etapas que lo componen (Oscilador, *Mosfet*, *Cockcroft Walton Voltage Multiplier* y Regulador de Temperatura), necesarios para la polarización del MPPC. Junto a esto, se diseñó e implementó un circuito regulador de tensión que otorgará mayor flexibilidad para los voltajes de alimentación del prototipo, pudiendo ser alimentado con voltajes mayores a los 5[V], pero regulado finalmente a una tensión fija de 5[V] por parte del dispositivo. Se culmina con la implementación de una PCB que genera la señal análoga de salida y actúa como amplificador de carga en la etapa previa a la lectura de datos.

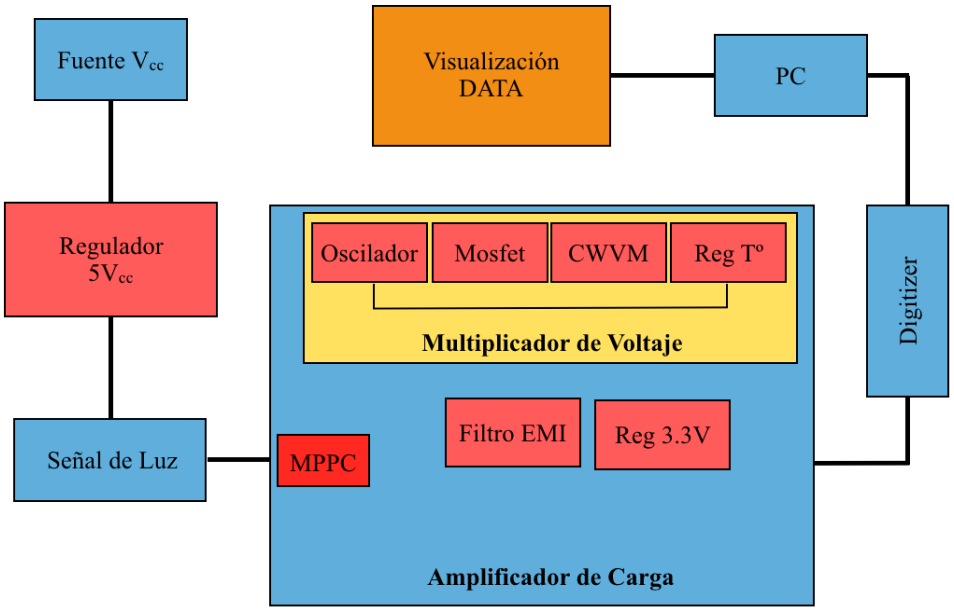


Figura 4.1: Diseño general del hardware utilizado

[4] Para referirse a todo el circuito de multiplicación de tensión se utilizará este nombre, mientras que cuando se refiere a las *etapas de multiplicación* se menciona la configuración tipo Cockcroft Walton.

4.2 Multiplicador de Voltaje

El prototipo ha sido configurado para operar a 5[V], sin embargo, existen componentes como los MPPC que requieren de valores de tensión más elevados para alcanzar su nivel de operación, cercanos a los 70[V]. A raíz de esto se hace necesario contar con un circuito capaz de generar esta tensión a partir de una señal de entrada de 5[V].

Un multiplicador de tensión es un circuito eléctrico que convierte la energía eléctrica de CA de un voltaje más bajo a un voltaje DC más alto, típicamente usando una red de condensadores y diodos *[22]*.

La mayor ventaja de estos circuitos es que el voltaje a través de cada etapa de la cascada (compuesta por dos diodos y dos condensadores) es igual a dos veces el voltaje máximo de entrada en un rectificador de media onda.

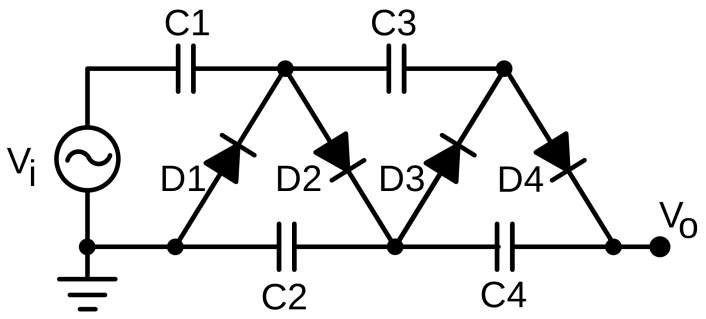


Figura 4.2: Diseño Cockcroft-Walton de dos etapas

URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cockcroft_Walton_voltage_multiplier_circuit.svg

Para explicar el funcionamiento del circuito, se utilizará la figura 4.2 con una configuración de dos etapas. Se supone que el circuito es alimentado por una fuente de tensión alterna V_i con un valor *peak* de V_P. Al encender la fuente se tiene que:

- Cuando el voltaje de entrada V_i alcanza su *peak* negativo $-V_P$, la corriente fluye a través del diodo D_1 para cargar el condensador C_1 a un voltaje V_P.

- Cuando V_i invierte la polaridad y alcanza su *peak* positivo $+V_P$, se suma a la tensión del capacitor, produciendo un voltaje de $2V_P$ en el nodo de D_1 y D_2. Al estar D_1 polarizado en inversa, la corriente fluye de C_1 a través del diodo D_2, cargando el condensador C_2 a un voltaje de $2V_P$.
- Cuando V_i invierte la polaridad de nuevo, la corriente de C_2 fluye a través del diodo D_3, carga el condensador C_3 a una tensión de $2V_P$.
- Cuando V_i invierte la polaridad de nuevo, la corriente de C_3 fluye a través del diodo D_4, carga el condensador C_4 a una tensión de 2Vp.

Con cada cambio en la polaridad de la entrada, la corriente fluye a los condensadores a través de los diodos, hasta que todos se cargan. Todos los condensadores se cargan a una tensión de $2V_P$, salvo para C_1, que se carga a V_P. Para la multiplicación de tensión, se tiene que los condensadores se cargan en paralelo y se encuentran conectados en serie a la carga. C_2 y C_4 están en serie entre la salida y la tierra, por lo que el voltaje de salida total es $V_o = 4V_P = 2V_{PP}$.

En general la relación entre el voltaje de entrada y voltaje de salida está dada por la ecuación 4.1.

$$V_O = 2NV_P = NV_{PP} \text{ , con N el número de etapas} \qquad \textbf{(ec. 4.1)}$$

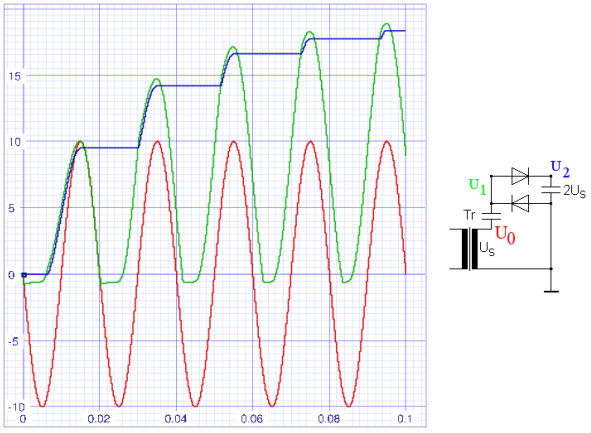


Figura 4.3: Simulación para una configuración de una etapa

URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Villard_cascade_simulation.png

Como muestra la figura 4.3, se requiere más de un ciclo para llegar a la tensión deseada, aumentando progresivamente en base a la frecuencia y constante de carga de los condensadores.

4.2.1 Diseño Esquemático

El diseño del circuito ha sido desarrollado con 23 etapas de amplificación, siendo alimentado con un voltaje de entrada de 5[V] para lograr compatibilidad con puertos USB. Junto a lo anterior, se considera su tamaño y bajo costo (cercano a los US$20) como elementos claves para su confección.

Teóricamente, con 23 etapas y una señal de entrada de 5[V] *peak to peak*, el voltaje de salida debiese ser de 115[V] según la ecuación 4.1. Debido a las perdidas de diodos y condensadores se llegó a un máximo de 105[V], que es muy superior a los ~65[V] requeridos para polarizar los MPPC de la serie (S12572-100P) utilizada.

Existe un factor interesante a considerar, y es que mientras más voltaje se tiene en la entrada, mayor es el *ripple* en la salida, fenómeno que se repite si es que se aumenta el número de etapas. Producto de esto es que es necesario transar un punto medio entre ambos conceptos, según lo que se necesite. Para este dispositivo se consideraron más etapas, ya que en el laboratorio existen MPPC con voltaje de polarización mayor, factor que influyó en que se trabajara con un amplio rango de valores. El *ripple* finalmente es reducido por un filtro pasa bajo RC, disminuyendo el valor V_{PP} desde cerca de 1[V] al orden de los 20[mV].

La figura 4.4 muestra el esquemático general del Multiplicador de Voltaje, encasillando los 4 módulos que lo componen y que son detallados a continuación:

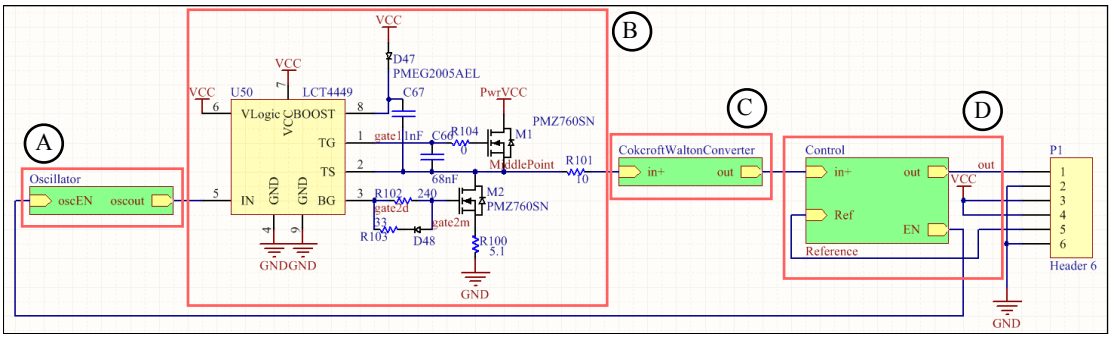


Figura 4.4: Esquemático Regulador de Tensión

A - Oscilador

Corresponde a un circuito oscilador activado y desactivado por la señal V_{EN}, capaz de convertir la señal de corriente continua en corriente alterna de una determinada frecuencia.

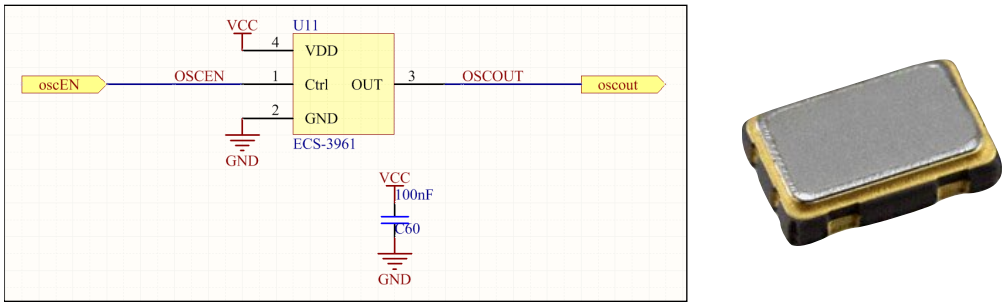


Figura 4.5: Esquemático Etapa de Oscilación & Oscilador utilizado (ECS-3961)

B - Mosfet Driver

Producto que el CWVM puede llegar a tener *peaks* de corriente cercanos a 1[A], es que se necesita un circuito integrado capaz de soportar tal carga. Este dispositivo entrega una señal de entrada al CWVM con la corriente suficiente para garantizar su correcto funcionamiento.

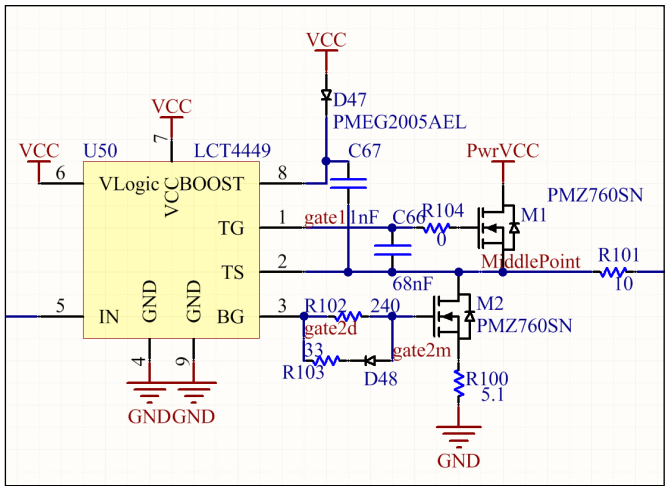


Figura 4.6: Esquemático configuración Mosfet Driver

La figura 4.6 muestra el esquemático del circuito implementado, donde se utilizó el controlador LTC4449, con una configuración entregada por el fabricante para conducir ambos *mosfet*, reduciendo pérdidas por conmutación.

C - Etapas de amplificación (Cockcroft Walton)

Corresponde a las 23 etapas de amplificación de un multiplicador de voltaje, elevando la tensión, desde los 5[V] en la entrada hasta alrededor de los 105[V] a la salida.

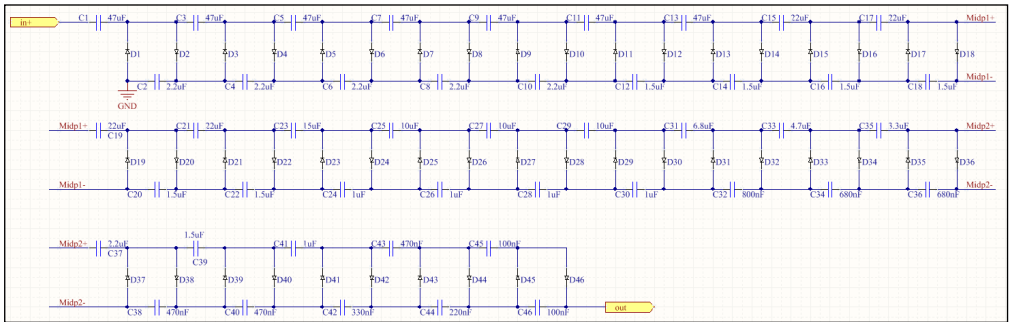


Figura 4.7: Esquemático etapas de amplificación CWVM

D - Control de temperatura

Lo que busca este sistema de control es que el voltaje medio del CWVM se mantenga en torno a un voltaje de referencia externo, independiente de las variaciones de temperatura, realizando las correcciones correspondientes. Para realizar esto, se aprecia un sensor de temperatura en el "*punto 1*", el cual genera un aumento de la corriente al elevar la temperatura, evento que desencadena un alza en la tensión en la entrada inversora del "*punto 3*". Por su parte en el "*punto 2*" se tiene el voltaje de salida del CWVM (~105[V]), el cual a través de un divisor de tensión se conecta a la entrada no inversora del amplificador operacional del "*punto 3*", que se comporta como un restador.

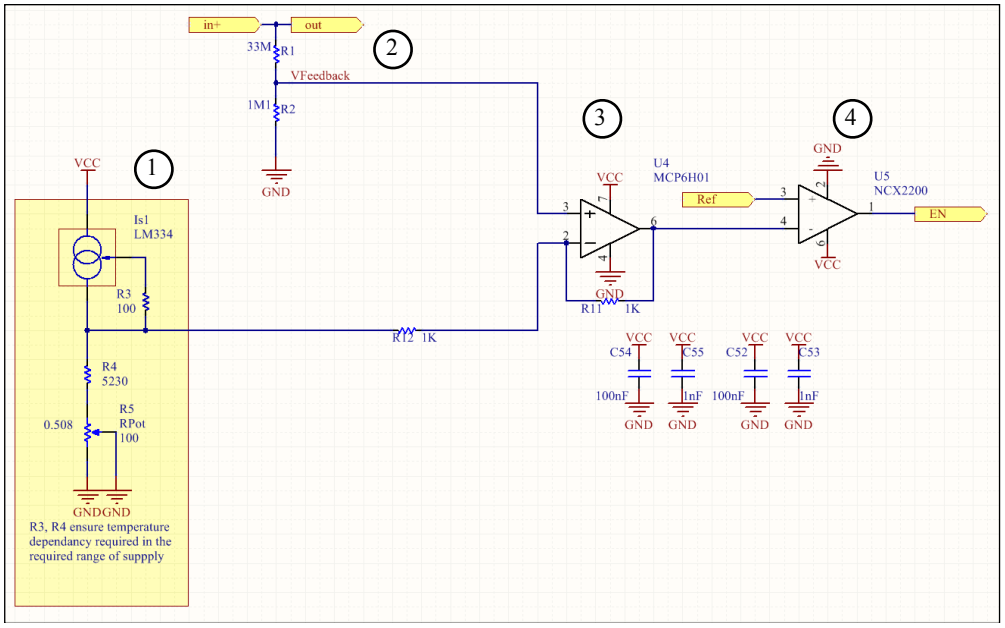


Figura 4.8: Esquemático sistema de control

En el "*punto 4*" tenemos que finalmente el sistema de control se comportará como un switch ON/OFF, en base a la comparación que realiza entre la referencia y la entrada no inversora, proveniente del "*punto 3*". Por ende, en caso de que la tensión de la referencia sea mayor a la entrada no inversora, se

habilita el oscilador para que el voltaje del CWVM aumente y en caso contrario deshabilita el oscilador, disminuyendo su voltaje y manteniéndolo en torno al voltaje de referencia.

Se puede apreciar que el "*punto 3*" funciona como una salida ON/OFF que alimenta el pin de deshabilitación del oscilador V_{EN}, por lo tanto el circuito oscila cuando estamos por debajo de la referencia y deja de oscilar en caso contrario. Desde este punto de vista hay una pequeña histéresis que se produce, principalmente por el tiempo de reacción del oscilador.

4.2.2 Diseño PCB

El diseño de esta PCB ha sido desarrollado en el software *Altium Designer* y confeccionado posteriormente por la empresa *PCBCart*. El montaje de componentes se ha realizado en el laboratorio (CCTVal) por parte del equipo especializado para tal efecto.

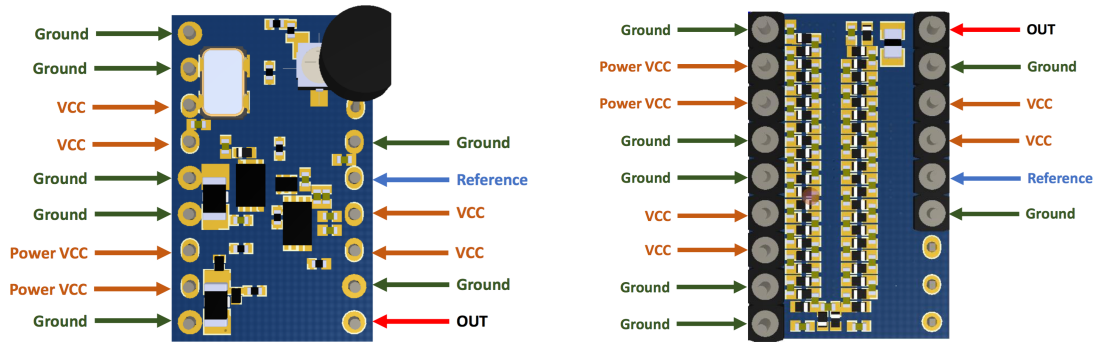


Figura 4.9: Vista 3D con especificación de *pines* del Cockcroft-Walton

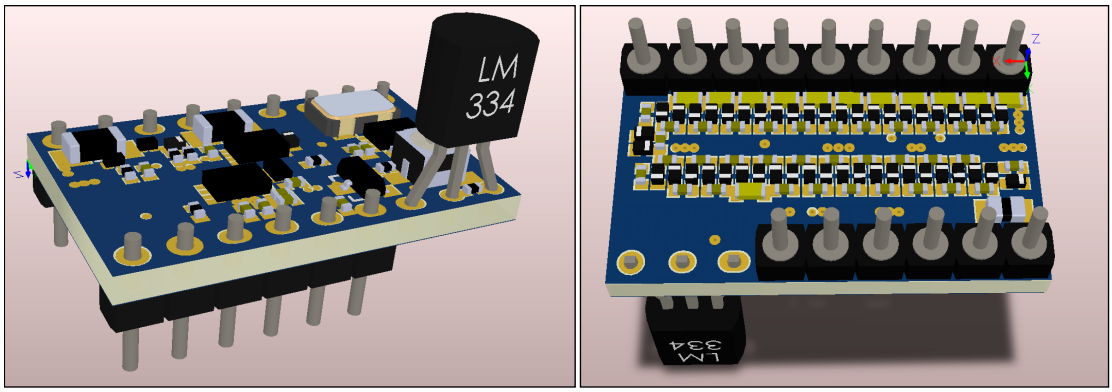


Figura 4.10: Vista 3D superior e inferior Cockcroft-Walton

4.3 Amplificador de Carga

El circuito amplificador de carga, tiene como objetivo amplificar la carga generada por el MPPC para que pueda ser leída por el *digitizer* u osciloscopio. Para esto cuenta con varias etapas, las que posibilitan el funcionamiento esperado y son explicadas en la sección 4.3.1. Además, es el circuito que se encarga de alimentar al CWVM, junto con filtrar los ruidos de entrada y salida.

4.3.1 Diseño Esquemático

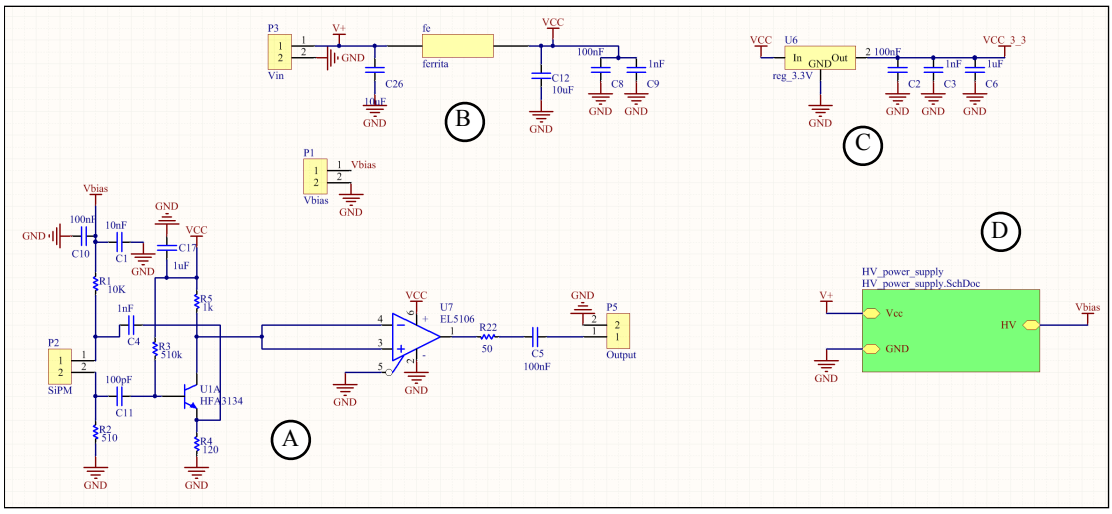


Figura 4.11: Esquemático Amplificador de Carga

La figura 4.11 muestra el esquemático general del Amplificador de Carga, encasillando los 3 módulos que lo componen y que son detallados a continuación:

A - Configuración MPPC y Amplificación

Corresponde a la configuración básica del fabricante *Hamamatsu* para un MPPC, donde se alimenta con V_{BIAS} (~65[V]). El transistor funciona como configuración de emisor común, donde la corriente de colector es elegida en el orden de los mA ya que presenta mejor respuesta en frecuencia y bajo consumo. La corriente emitida por el MPPC, circula a través de R_2, cargando al mismo tiempo a C_{11} con una constante de carga R_2C_{11} y descargándose posteriormente a través de R_3.

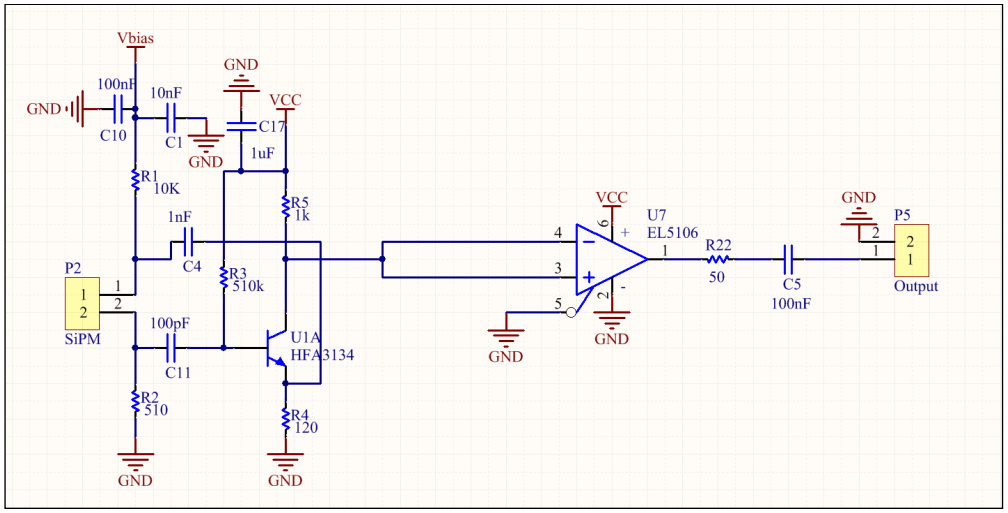


Figura 4.12: Esquemático configuración MPPC y amplificación

Como la constante de descarga es mayor que la de carga, vemos la onda característica de los MPPC (ver figura 4.13). Esta configuración es necesaria, ya que debe existir un tiempo suficiente para poder integrar la señal y obtener, por ende, la carga que tiene ésta. Al mismo tiempo si es que la constante de tiempo es muy grande, se corre el riesgo de que una nueva señal

llegue antes de que la señal original haya sido medida por completo, superponiéndose entonces a la primera señal.

C_4 no corresponde a la configuración básica y es añadido con el propósito de alivianar la corriente que debe entregar el CWVM en caso de altos *peaks* de corriente producto de radiación.

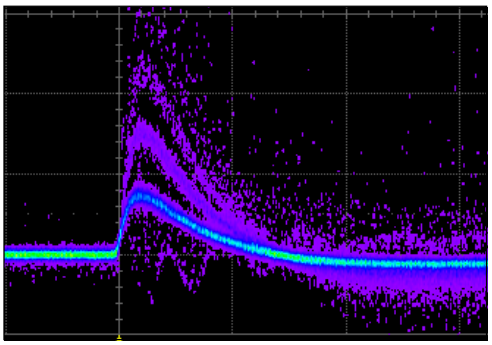


Figura 4.13: Señal salida MPPC

La señal de tensión que se emite luego del transistor (V_{CE}) es amplificado 8,33 veces e invertido según la ecuación 4.2.

$$G = \frac{V_C}{V_B} = -\frac{R_C}{R_E} = -\frac{R_5}{R_4} = -\frac{1000}{120} = -8.333 \qquad \textbf{(ec. 4.2)}$$

B - Filtro EMI

Al tener varios circuitos (detectores) conectados a una misma fuente, es factible apreciar cómo el ruido se propaga de un detector a otro a través de V_{cc}, por lo que un filtro que reduzca significativamente este fenómeno toma gran relevancia.

Es por lo anterior que este módulo, se comporta como un filtro EMI[5], reduciendo la contaminación proveniente de la fuente de alimentación (5[V]) y filtrando la alta frecuencia espuria, a través de una red de condensadores a tierra.

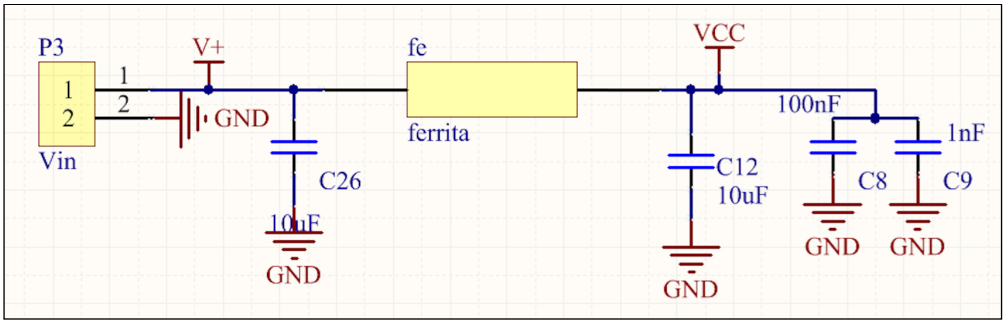


Figura 4.14: Esquemático Filtro EMI

C - Regulador 3.3[V]

Corresponde a un circuito de regulación fija de voltaje, con salida de 3.3[V] el cual es utilizado para la referencia del CWVM y para otras aplicaciones que tenía la placa antes de ser modificada, por lo que para esta versión sólo cumple lo anteriormente mencionado. Junto a la etapa de regulación podemos ver distintos filtros para eliminar el ruido.

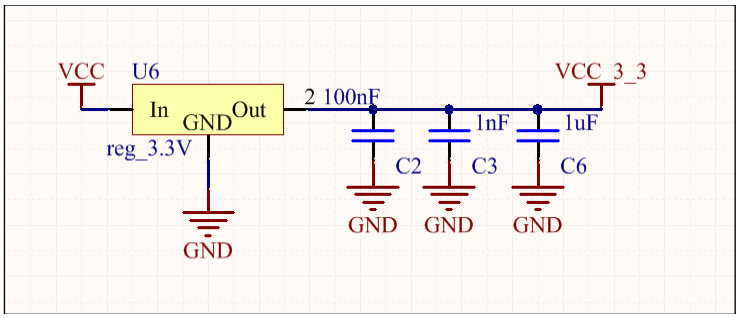


Figura 4.15: Esquemático Regulador 3.3[V]

[5] La interferencia electromagnética es la perturbación que ocurre en cualquier circuito, componente o sistema electrónico causada por una fuente de radiación electromagnética externa o interna. https://es.wikipedia.org/wiki/Interferencia_electromagnética.

D - Conexión CWVM

Corresponde a la conexión realizada para adaptar el CWVM a la placa amplificadora de carga. A la izquierda se aprecia un divisor de tensión, el cual se utiliza para regular el voltaje de referencia del pin número 5, explicado en mayor detalle en la sección 4.2.1.

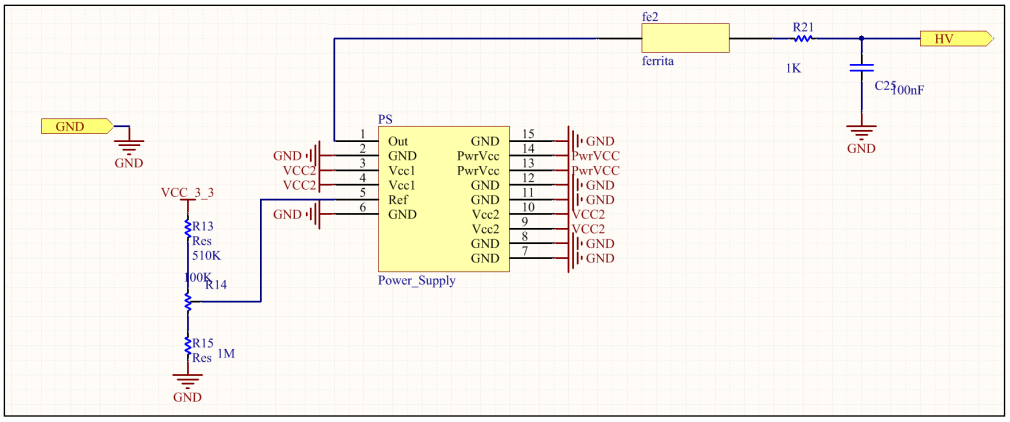


Figura 4.16: Esquemático conexión CWVM

4.3.2 Diseño PCB

La PCB ha sido diseñada y desarrollada con el software *Altium Designer*. Su posterior confección se materializó con la empresa *PCBCart*. En último lugar se realizó en montaje de los componentes, labor realizada en el laboratorio (CCTVal) por parte del equipo especializado en este tipo de tareas.

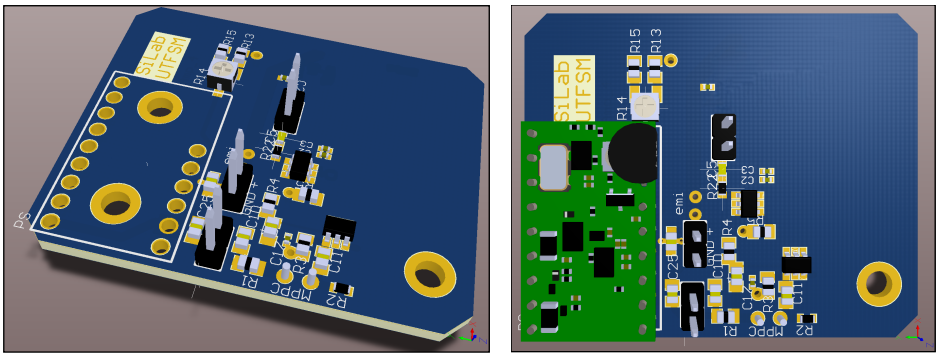


Figura 4.17: Vista 3D superior Amplificador de Carga

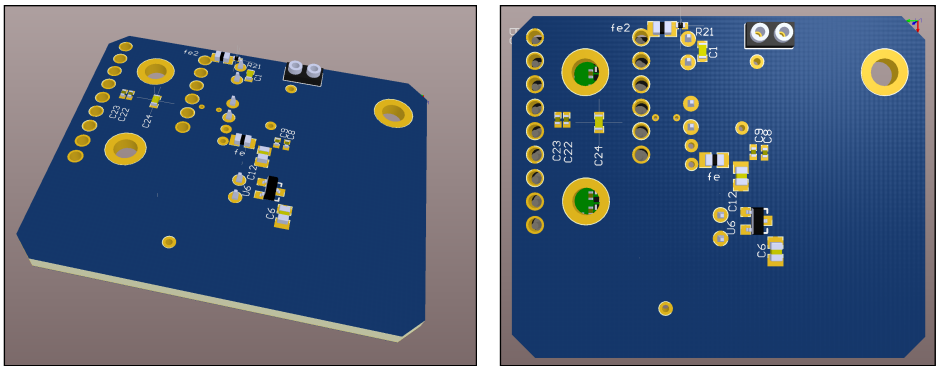


Figura 4.18: Vista 3D inferior Amplificador de Carga

4.3.3 Mediciones y ajustes

Al ser un proyecto desarrollado en el CCTVal, muchas tecnologías se utilizan en varios proyectos. En el caso del circuito Amplificador de Carga se tenía una configuración similar a la que se necesitaba, pero requería la materialización de ciertos cambios para adaptar la electrónica. Lo presentado anteriormente es la descripción luego de desechar algunos componentes que tenían otro propósito y cambiar ciertas resistencias para adecuar los voltajes de polarización que requerían los MPPC. En las conclusiones también se añaden recomendaciones para versiones futuras, luego de observar fenómenos experimentales que dificultaban ciertos procesos de adquisición.

Dicho lo anterior, los primeros pasos consisten en probar el correcto funcionamiento de la electrónica y ajustar los potenciómetros para proporcionar un voltaje de operación adecuado en los MPPC, ya que de no hacerlo se corre el riesgo de trabajar en saturación o falta de ganancia, factores que afectan en la calibración posterior.

Se presentan a continuación los 2 primeros canales sometidos a análisis. Para realizar esto se utilizaron detectores de muones, los que constan de un plástico centellador (aislado de luz) de las mismas características a los utilizados en el prototipo realizado. A este plástico se le ha incrustado una fibra óptica, la cual transporta la luz hasta un

MPPC que se conecta al Amplificador de Carga. Tanto el plástico, como la fibra óptica y el MPPC están completamente sellados tal como se muestra en la figura 4.19.

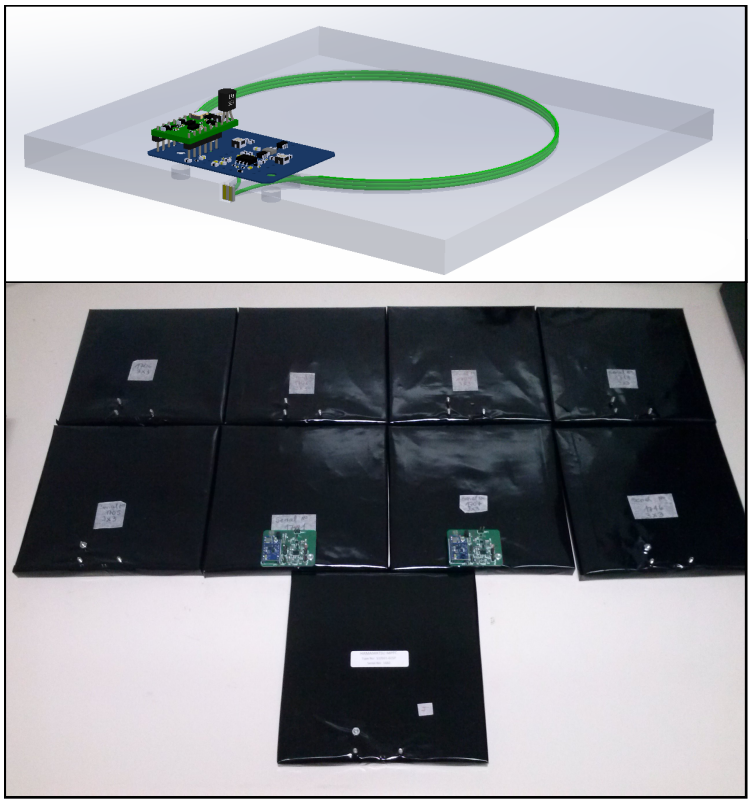


Figura 4.19: Imagen de los plásticos detectores de muones

Se observa que en las primeras mediciones fue imposible distinguir entre señales producto de ruido y muones (Figura 4.20). Para poder tener una lectura más precisa de los datos se disminuyó la ganancia con el uso de los potenciómetros presentes en la placa electrónica Amplificadora de Carga y se reguló el *trigger* obteniendo las mediciones presentes en la Figura 4.21. Producto de la amplitud de las señales, su forma de onda y tasa de evento, es simple determinar que se está en presencia de muones, ya que es el único tipo de partículas (presentes naturalmente en el ambiente) capaz de incidir en el plástico centellador. En el caso de partículas alfa, son fácilmente detenidas por el plástico negro que se aprecia en la Figura 4.19.

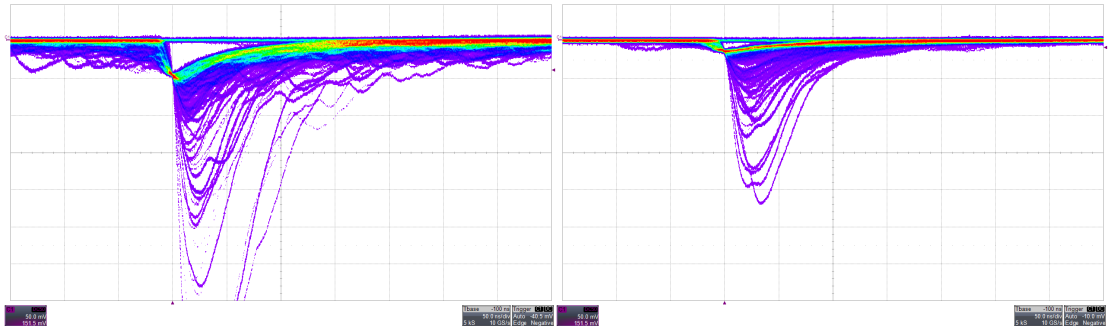


Figura 4.20: Primeras mediciones en saturación

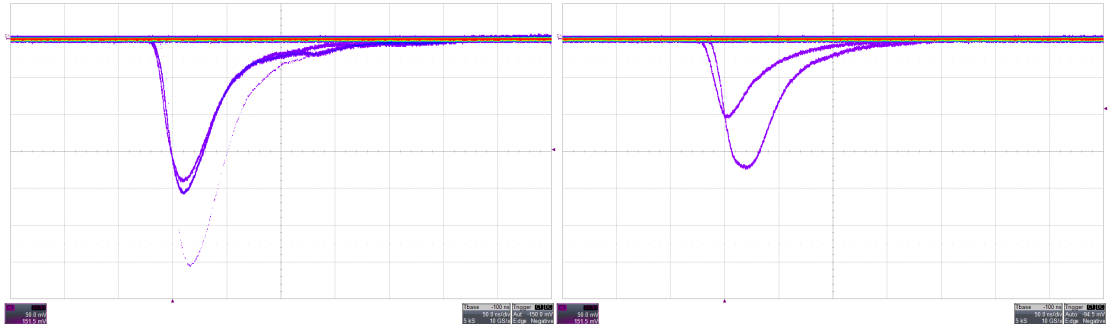


Figura 4.21: Primeras mediciones luego de regular la ganancia

En una primera instancia se detectó bastante ruido en la señal no asociable a lo que se buscaba medir. Distintas pruebas se realizaron hasta que se determinó que interferencia electromagnética del ambiente estaba causándolo, principalmente los teléfonos celulares. Esto se debe a que al realizar una llamada cerca del equipo, el espectro se saturaba completamente de ruido, siendo imposible distinguir alguna señal de fondo o de interés. Ya detectado el problema se procedió a envolver los cables, que van desde el MPPC hasta el circuito Amplificador de Carga, en cobre, generando el conocido concepto de “Jaula de Faraday”. De este modo se solucionó el principal inconveniente presentado a la hora de tomar mediciones. Una imagen de lo realizado se puede apreciar en la Figura 4.22.

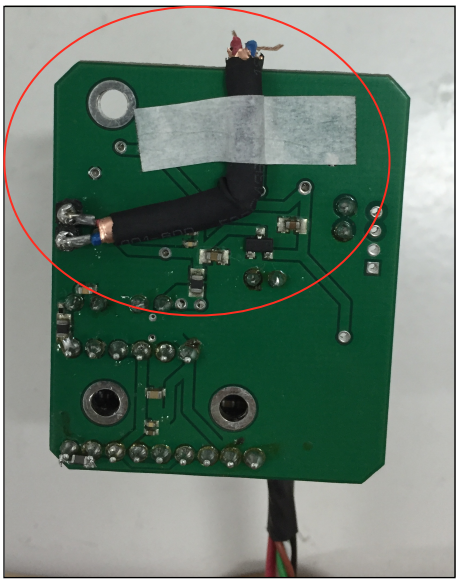


Figura 4.22: Se cubren los cables con cobre (Jaula de Faraday)

4.4 Regulador de Voltaje

Los reguladores de voltaje están diseñados para mantener automáticamente un nivel de tensión constante. En el detector es fundamental mantener tensión de operación de los MPPC lo más estable posible, ya que debido a las etapas de amplificación de tensión que existen en el circuito, un pequeño cambio en tensión de entrada produce una variación amplificada (según número de etapas) a la salida, variando el voltaje de operación del MPPC y por ende, influyendo en el funcionamiento esperado, según los efectos que han sido comentados anteriormente como los *afterpulses* o PDE (3.2.1.1 y 3.2.2 respectivamente).

4.4.1 Diseño Esquemático

Los reguladores utilizados son LM317 y LM337 (complemento negativo al LM317). Éstos se configuraron para entregar un voltaje de salida constante de 5[V] y -5[V] respectivamente. Ambas tensiones son las que alimentan al circuito, siendo un amplificador de corriente (considerado en una primera versión) el que utiliza la de

polarización negativa. Producto de modificaciones en el amplificador de carga es que la nueva configuración no necesita de los -5[V] y se polariza sólo a tensión positiva, razón por la que no se utiliza tal regulador (LM337) para la versión final. Sin embargo se presenta la placa desarrollada con ambas configuraciones ya que cumple los requerimientos tanto para la versión antigua como la nueva del amplificador de carga. La ecuación y esquemático se detallan a continuación:

$$V_{OUT}^{(LM\,317)} = 1.25 \cdot \left[1 + \left(\frac{R_2 + R_3}{R_1}\right)\right] \qquad V_{OUT}^{(LM\,337)} = -1.25 \cdot \left[1 + \left(\frac{R_5 + R_6}{R_4}\right)\right] \qquad \textbf{(ec. 4.6)}$$

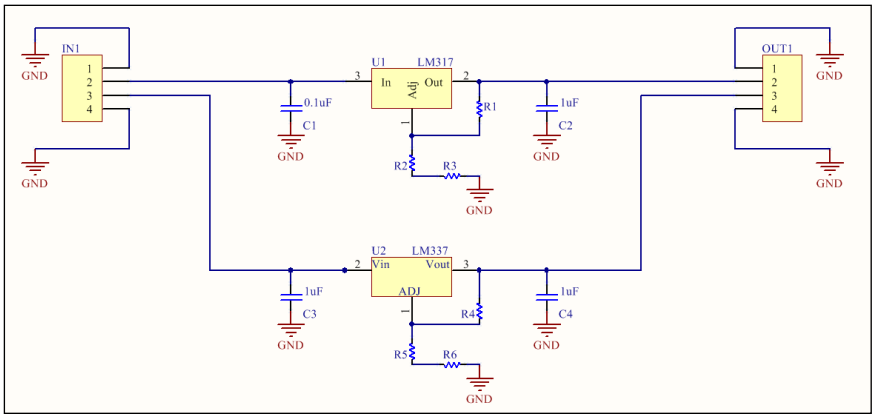


Figura 4.23: Esquemático Regulador de Voltaje

Según la ecuación 4.6 y para lograr los voltajes de salida requeridos (5[V] y -5[V]), se utilizan los siguientes componentes:

C1	C2	R1	R2	R3
0.1 [µF]	1 [µF]	2400[Ω]	3300 [Ω]	3900 [Ω]
C3	**C4**	**R4**	**R5 serie R6**	
1 [µF]	1 [µF]	1200 [Ω]	3600 [Ω]	

Figura 4.24: Tabla componentes utilizados en Regulador de Voltaje

Los condensadores fueron elegidos según la recomendación del fabricante, siendo de utilidad en caso de que la fuente de alimentación del regulador varíe (C1 y C3) y para la estabilización de la salida (C2 y C4).

4.4.2 Diseño PCB

El diseño de esta PCB ha sido desarrollado en el software *Altium Designer* y confeccionado posteriormente en una fresadora "*Roland Model A MDX-40*". Para cumplir con los parámetros de espacio necesarios es que el diseño se realiza en 2 capas, permitiendo a la vez independizar los dos reguladores.

Se muestra a continuación el diseño realizado junto a la materialización de éste en las figuras 4.25 y 4.26 respectivamente.

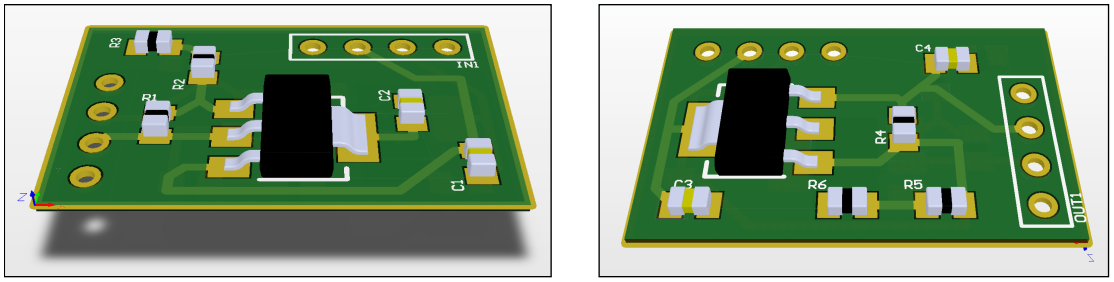


Figura 4.25: Vista 3D superior e inferior Regulador de Voltaje

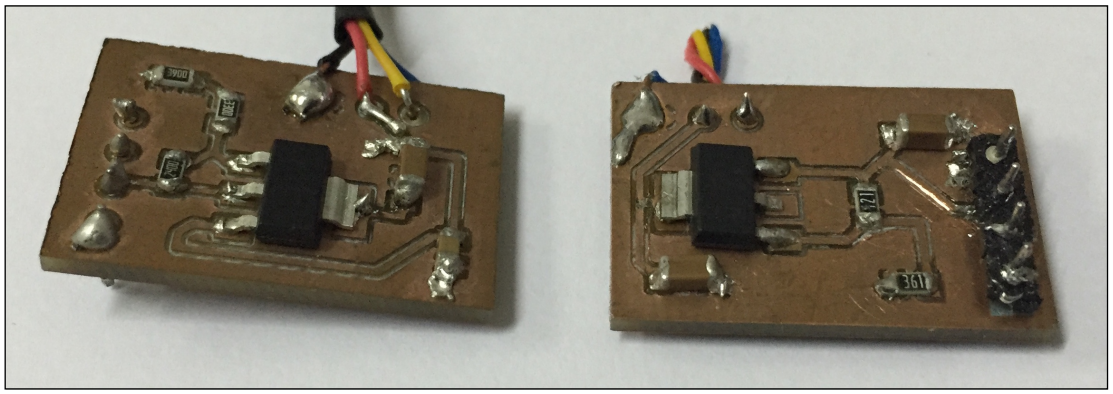


Figura 4.26: Vista real superior e inferior Regulador de Voltaje

3.4.3 Mediciones y ajustes

Ya fabricada la tarjeta y soldado sus componentes se procede a verificar el funcionamiento esperado mediante la realización de mediciones. Para tal propósito se conectó la entrada a una fuente de voltaje, variando la tensión cada 0.5[V] hasta llegar a los 10[V] y -10[V] , comprobando que el circuito fuese capaz de regular su salida a los 5[V] y -5[V] esperados.

CPAÍTULO 5 - DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

5.1 Descripción general

En el siguiente capítulo el trabajo se centra en la construcción de todas las piezas propias del prototipo que están orientadas a la detección de muones y partículas alfa, junto con la posterior canalización de los fotones, a través de las fibras ópticas y guías de luz, que son emitidos como reacción a la radiación por parte de los plásticos centelladores. Se presenta el armado completo de la estructura, finalizando todo lo que es el prototipo, listo para ser conectado a la adquisición y análisis de datos.

La estructura cuenta con dos tipos de detectores, los que son tratados en adelante como “detector principal” y “detectores secundarios”, conteniendo ambos la misma electrónica y componentes, con la diferencia que el detector principal cuenta con espaciado entre los plásticos centelladores, ya que a través de éste fluye aire gracias a una bomba, mientras que los detectores secundarios son trozos sólidos del mismo plástico centellador y aislados de aire. Se muestra a continuación una representación en 3D donde es posible apreciar ambos tipos de detectores.

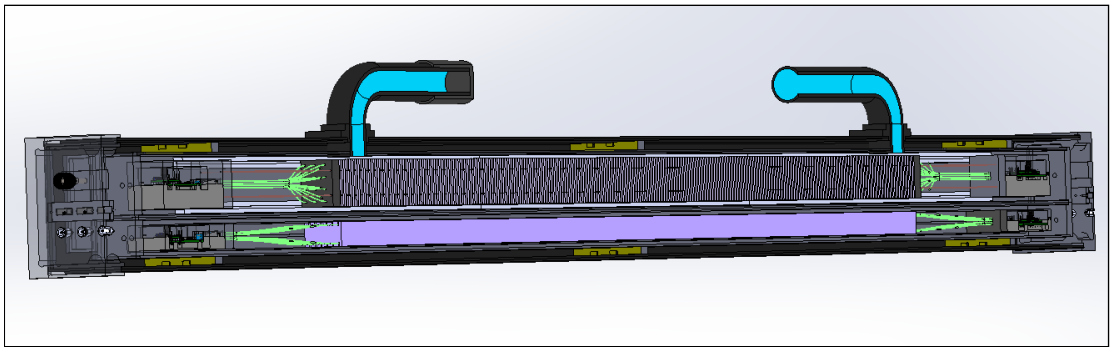


Figura 5.1: Vista transversal 3D del detector

La figura 5.1 muestra un corte longitudinal del detector, permitiendo ver su estructura interna. El proceso que realiza el detector para poder obtener señales a partir de radiación alfa (emisiones por Radón) y rayos cósmicos (muones) es detallado a continuación.

En primer lugar es necesario entender cómo se distribuyen los detectores a través de toda la estructura, existiendo uno principal (P) y tres secundarios (S) tal como se detalla en la figura 5.2, encontrándose “S” aislados de aire por un perfil de aluminio y “P” con un flujo de aire desde el exterior (ambiente) que es renovado a través de una bomba de aire conectada a una de las boquillas presentes en la estructura.

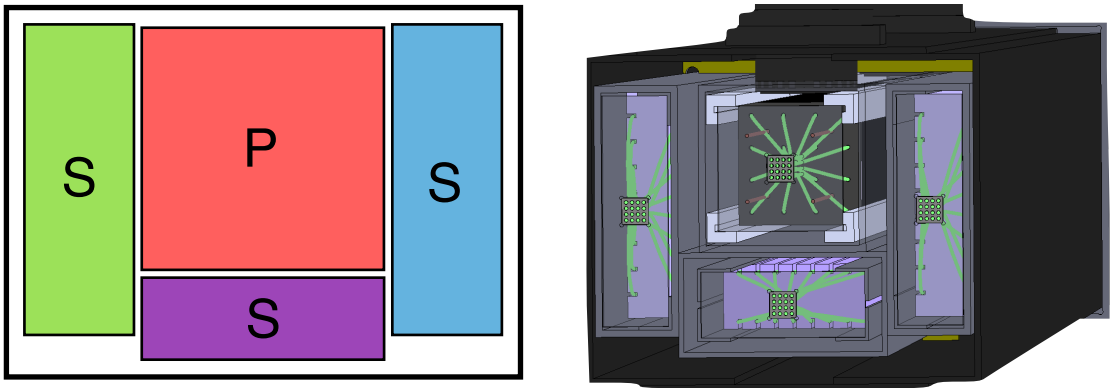


Figura 5.2: Representación tipos detectores y vista transversal 3D

Dicho esto es que el proceso para la obtención de datos tiene la siguiente cronología:

1. Los plásticos centelladores emiten fotones a partir de la interacción que realizan con los muones y partículas alfa.
2. Los fotones, son captados por las fibras ópticas (16 unidades por detector) presentes en la sección transversal de los detectores como se muestra en la figura 5.3 y dirigidos a uno de los extremos del detector respectivo.

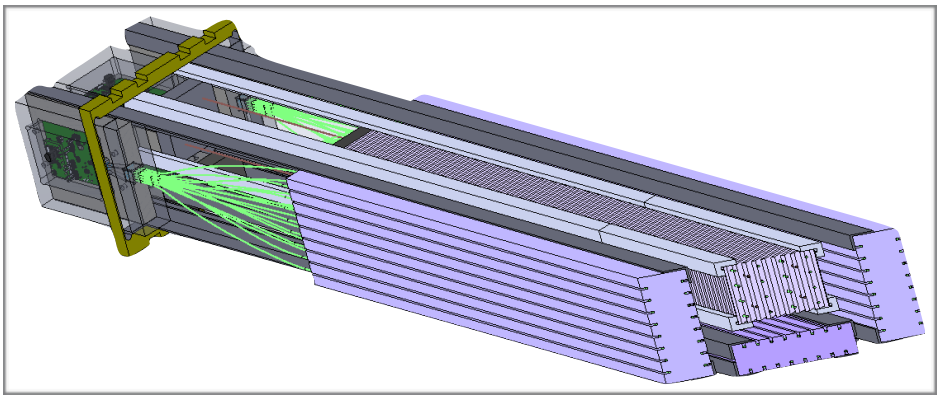


Figura 5.3: Vista 3D de las fibras ópticas dentro de los detectores

3. Las guías de luz hacen converger los fotones provenientes de las fibras ópticas a una sección de 3·3[mm], lugar donde se ubica un MPPC. (ver figura 5.4)

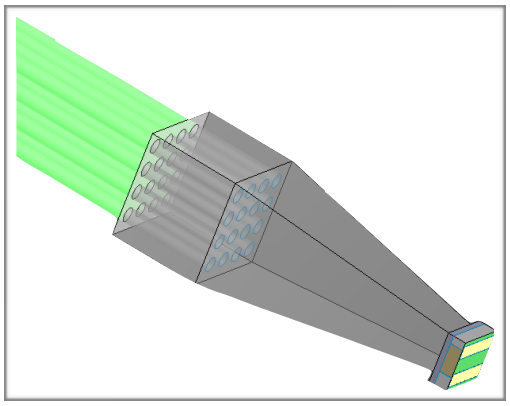


Figura 5.4: Vista 3D de las fibras ópticas junto a la guía de luz y MPPC

4. El MPPC (que se encuentra pegado al extremo de la guía de luz) capta los fotones, transformando la señal luminosa en una señal eléctrica.
5. La electrónica involucrada procesa la señal, amplificándola a partir de los fotones con el propósito de ser adquirida por un dispositivo externo, tal como un *digitizer* u osciloscopio. La figura 5.5 muestra la conexión que se realiza hacia la electrónica.

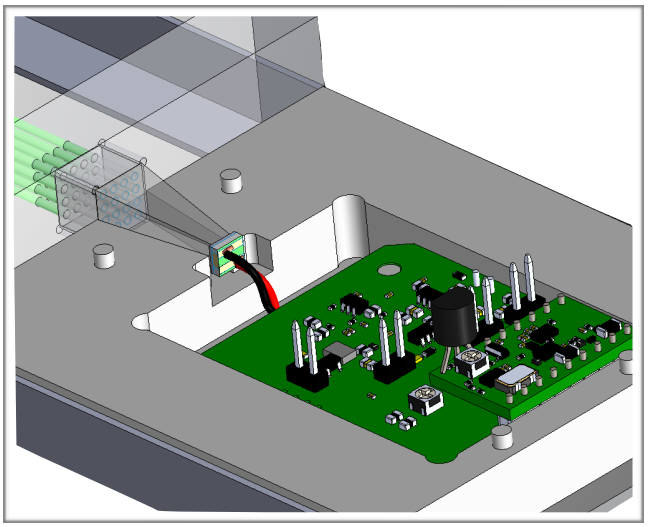


Figura 5.5: Vista 3D de la conexión entre el MPPC y la electrónica

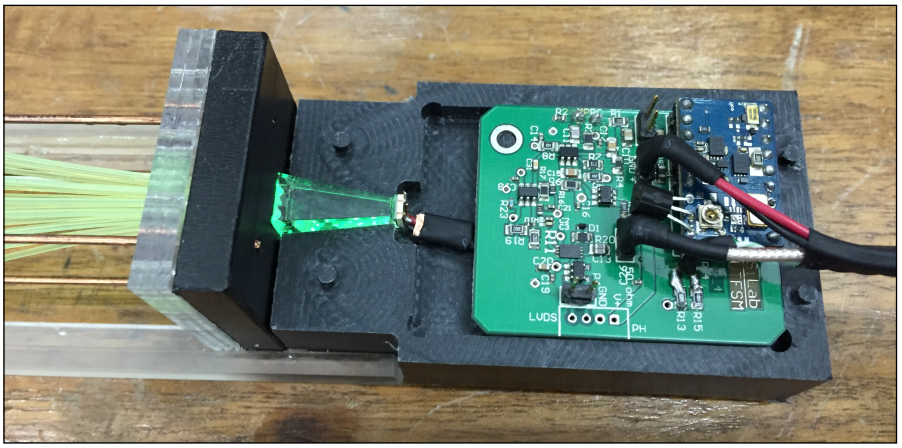


Figura 5.6: Vista real de la conexión entre el MPPC y la electrónica

6. La electrónica se conecta a los paneles laterales del dispositivo, donde se encuentra la alimentación, potenciómetros para regulación de voltaje y conectores para la salida análoga generada por la electrónica. La figura 5.7 muestra de manera gráfica la conexión que existe entre la electrónica y el panel externo, dejando aislado de luz en dos etapas a los MPPC.

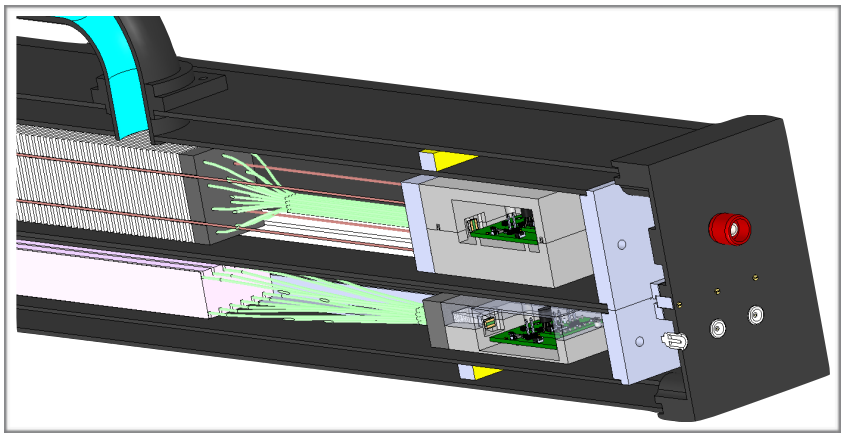


Figura 5.7: Vista 3D de la conexión entre la electrónica y panel externo

5.2 Multi Pixel Photon Counters (MPPC)

Los MPPC son confeccionados de fábrica por lo que su única relación en el proceso de diseño y construcción tiene relación con ser pegados a las guías de luz, tal como se muestra en el punto 5.3. Se presenta a continuación, en la figura 5.8, una imagen de los MPPC utilizados en la confección del prototipo.

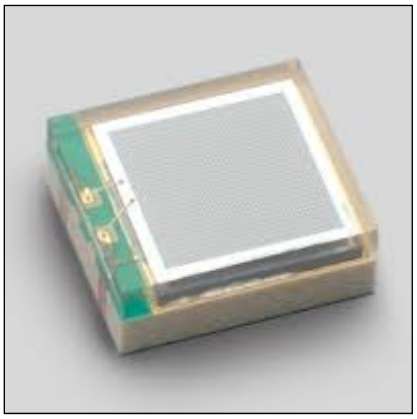


Figura 5.8: Vista de los MPPC utilizados

Cada uno de estos dispositivos es pegado a una guía de luz (punto 5.3) con pegamento óptico. Se utiliza este último ya que presenta el mismo índice de refracción que el acrílico (material de las guías de luz).

5.3 Guías de Luz

Las guías de luz están fabricadas a partir de acrílico UVT (Ultra Violet Transmission). Una vez que se producen fotones a partir de la desintegración producto del gas radón y el impacto de rayos cósmicos, éstos se transmiten a través de la fibra óptica y confluyen a una guía de luz, como la mostrada en las figuras 5.6 y 5.9.

El propósito de este elemento es hacer converger estos fotones a una área de 3·3[mm] que es precisamente la dimensión que presentan los MPPC utilizados para detectar la actividad de fotones.

5.3.1 Diseño 3D

Este diseño ha sido realizado en el software *Solid Works*, cumpliendo con los parámetros de diseño necesarios que garanticen el objetivo para el cual se utiliza, siendo el ángulo de corte de 8º.

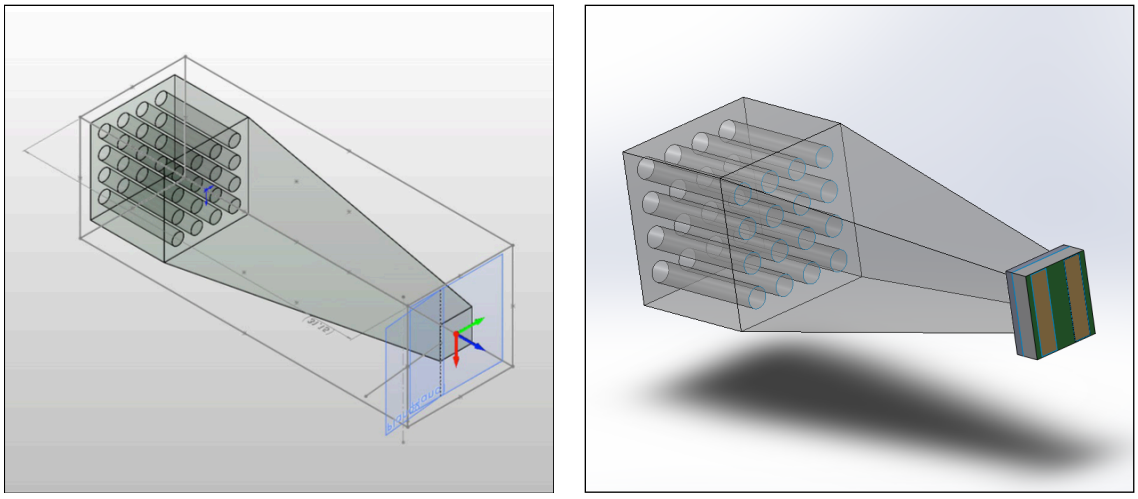


Figura 5.9: Vista 3D de la guía de luz y su conexión con el MPPC

5.3.2 Confección y Armado

En una primera etapa se mecaniza la estructura en una máquina CNC (*M8 Datron*) a partir de un bloque de acrílico, el cual luego es lijado en una máquina de pulido para garantizar un ángulo de 8º sin imperfecciones ni rugosidades, eliminando de este modo que se reflecten los fotones que inciden en su interior. Un mal pulido de este material repercutirá en un menor coeficiente de eficiencia en la transmisión de fotones.

5.4 Tapas exteriores

Las tapas tienen una doble función, que consiste en proporcionar una nueva capa de aislamiento de la luz exterior a todos los elementos sensibles que se encuentran en el interior, además de permitir una simple manipulación de los distintos elementos que deben ser manejados desde el exterior de la estructura. Estos últimos se dividen en tres secciones: alimentación (V_{cc} y tierra), arreglo de potenciómetros y arreglo de conectores (señal de salida).



Figura 5.10: Vista Frontal Tapa y Perfil

5.4.1 Diseño 3D

El diseño presente en las figura 5.11 es una representación 3D sólida y en transparencia realizada con el software *Solid Works*, el cual posteriormente se exporta en formato ".macro" o ".tap" para poder ser mecanizado en una máquina *CNC M8 Datron*.

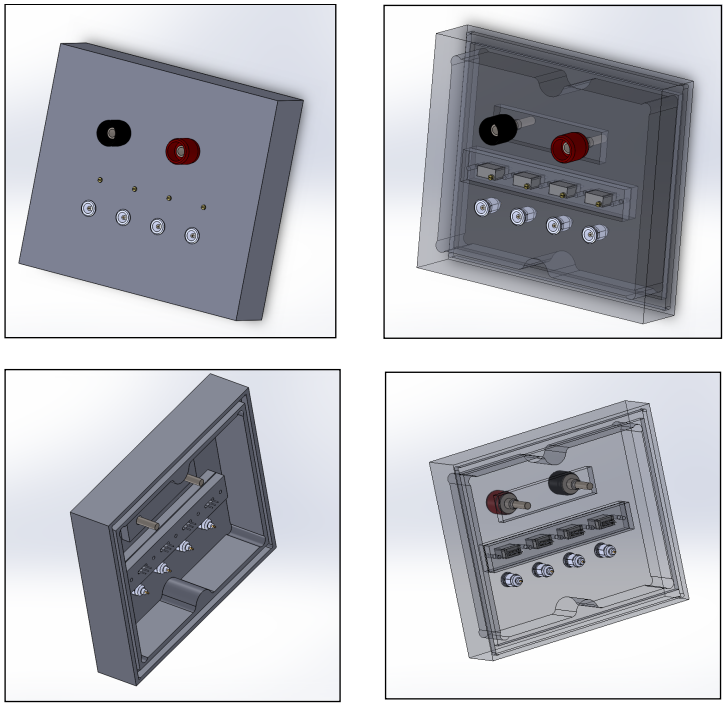


Figura 5.11: Vista 3D de las tapas por el interior y exterior en formato sólido y con efecto de transparencia

5.4.2 Confección y Armado

Su confección y armado comienza con la mecanización en la máquina CNC (*M8 Datron*) de un plástico polietileno de alta densidad, característica que contribuye a mantener el interior aislado de luz del exterior.

5.5 Contenedor

El contenedor comprende la estructura externa, que contiene al detector principal y los tres detectores secundarios. A éste se conecta el sistema de ventilación que alimenta al detector principal con un flujo de aire constante y es sellado en sus extremos laterales por las dos tapas exteriores. A su vez, cada detector es cubierto por un perfil de aluminio y sellado en los extremos laterales con tapas sólidas del mismo material que las tapas exteriores expuestas en la sección 5.4.

La figura 5.12 muestra una fotografía de la estructura externa o contenedor, mientras que al mismo tiempo se han coloreado los perfiles internos que cubren los detectores para una más clara visualización, presentando en conjunto una vista por los extremos laterales con los perfiles y las tapas de éstos claramente identificadas y cerradas. Lo único que se alcanza a ver son los cables de señal, alimentación y ajuste que son conectados a las tapas exteriores.

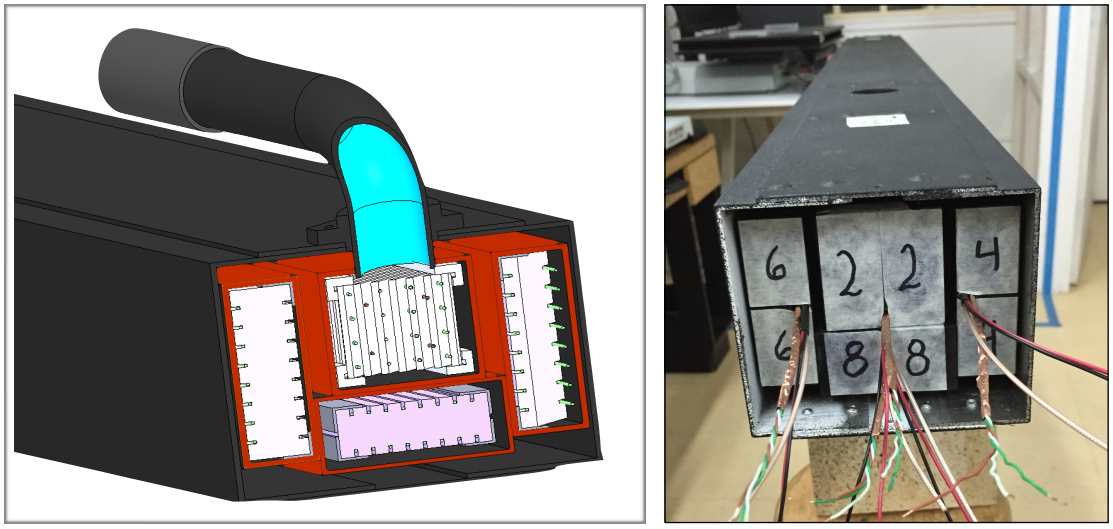


Figura 5.12: Vista 3D y real de los perfiles interiores que cubren a los detectores

5.5.1 Diseño 3D

A pesar de que la estructura no necesita ser mecanizada en la máquina CNC, el diseño es realizado en el software *Solid Works* para tener una representación de la distribución final del detector, junto a las medidas que componen cada parte y asegurando su correcto calce.

5.5.2 Confección y Armado

En este punto es necesario hacer una división en lo que son los perfiles internos, que cubren a los 4 detectores, y a la estructura externa o coraza que cubre la totalidad del detector. En cuanto a los primeros, se realiza una compra de perfiles de aluminio que más se acercan a las dimensiones que tienen los detectores, siendo necesario en algunos casos agregar algunos topes o recubrimiento de los detectores para aumentar el roce que generan con el perfil, dejándolo ajustado y sin movimiento. En cuanto a la estructura externa el proceso es distinto ya que es necesario cortar la plancha de aluminio y luego unirla, por lo que no se necesita contar con un tamaño aproximado, sin embargo su espesor se fija en 1,2 [mm] ya que se considera suficiente para aislarlo de luz.

5.6 Sistema de Ventilación Detector Principal

El sistema de ventilación tiene por objetivo hacer circular el aire a través del detector principal, impulsándolo desde el ambiente a través de una bomba para aquello. El aire introducido se libera por el otro extremo del detector, produciéndose una completa circulación a través de toda la sección longitudinal del detector, permitiendo que el radón presente en el ambiente se introduzca y genere decaimientos, proceso a través del cual se genera la liberación de partículas alfa.

5.6.1 Bomba de Aire

La bomba de aire es comprada en el comercio y su armado sólo requiere insertar su boquilla a la entrada de ventilación de PVC ubicada en el detector. Luego se hace firme a la estructura, quedando operando en forma ininterrumpida con el uso de una toma de corriente. A continuación se presenta una imagen de la bomba operando en el prototipo.

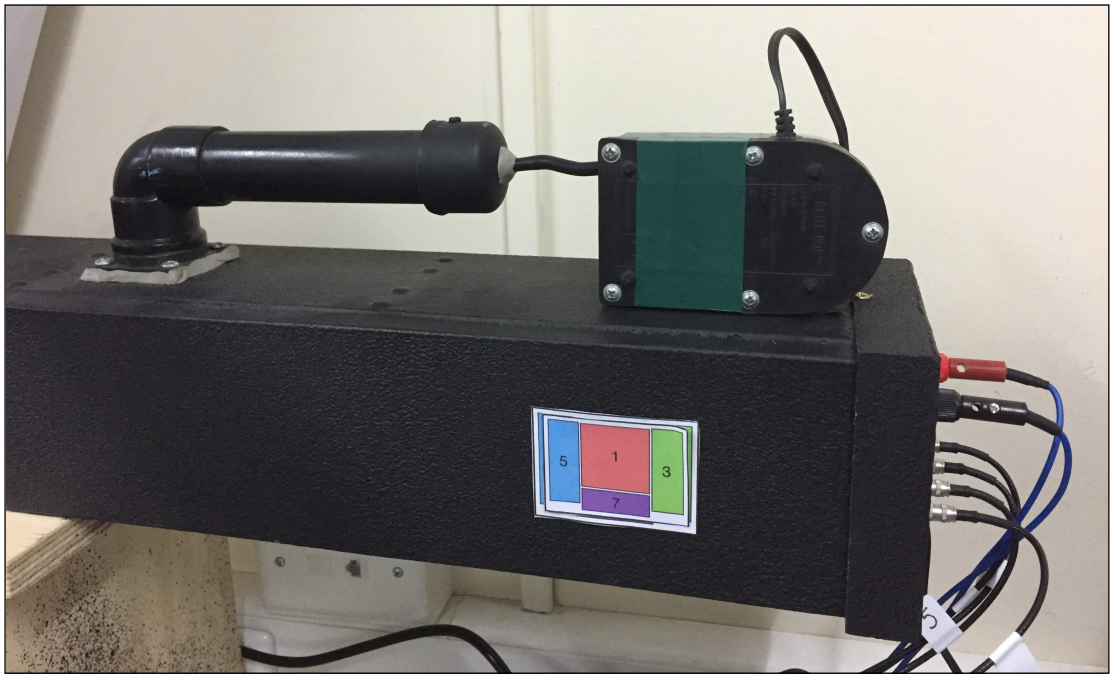


Figura 5.13: Configuración de la bomba de aire conectada a una de las boquillas del prototipo

CAPÍTULO 6 - RESULTADOS EXPERIMENTALES

6.1 Descripción general

A continuación, se da paso a los primeros resultados experimentales desarrollados durante la etapa de medición, donde el equipo ya está completamente sellado y la única interacción de calibración disponible se encuentra en los potenciómetros que tienen la facultad de regular la ganancia de los MPPC (variando la tensión de alimentación de los mismos).

Se procede a realizar una calibración para configurar una ganancia que permita verificar la presencia de muones al fijar un umbral (*trigger*) en cada uno de los 8 canales asociados a los MPPC. Posteriormente se realiza coincidencia para poder distinguir los fenómenos asociados a los muones, producto de la radiación cósmica, de aquellos asociados a las partículas alfa provenientes del decaimiento del gas radón.

6.2 Calibración

El primer paso necesario es poder distinguir la presencia de muones en cada uno de los 8 canales del prototipo. Si bien antes de ensamblar se realizó una prueba individual en cada circuito para comprobar su funcionamiento (con MPPC de prueba), en esta etapa es necesario ser más riguroso en cuanto a calibrar adecuadamente los potenciómetros, teniendo especial cuidado en que los MPPC a utilizar no se saturen o estén por debajo de su voltaje de operación. Motivo de lo anterior es que con el uso del osciloscopio en una primera etapa y posteriormente con el adquisidor, se realiza la calibración de los 8 canales, hasta poder distinguir claramente los muones de cualquier otra fuente que pudiese asociarse al ruido o a un factor distinto al tipo de partículas que buscan medirse.

El proceso utiliza un *digitizer* para la adquisición de las señales y sigue la siguiente lógica:

1. Se realiza la toma de 300.000 datos sin ningún tipo de *trigger* o *threshold*, a lo que se denomina adquisición de *dark rate* (figura 6.2). En otras palabras, el osciloscopio está recopilando cualquier información que genere el respectivo canal de medición, incluso en aquellos momentos donde no se tiene dato alguno. En este último caso, cuando no hay luz incidente y aun así se registran datos, se asocian al denominado "pedestal". Este fenómeno se aprecia en la figura 6.1, donde la mayoría de las mediciones no presentaron presencia de fotones. Sólo unos pocos eventos de 1 y 2 foto electrones se ven en la zona encerrada en rojo. Este es un fenómeno no deseable y generalmente, si bien, es interesante obtener un pedestal ya que entrega cierta información, se busca que sea de menor amplitud, cercana a la que puedan generar los datos de los primeros foto electrones.

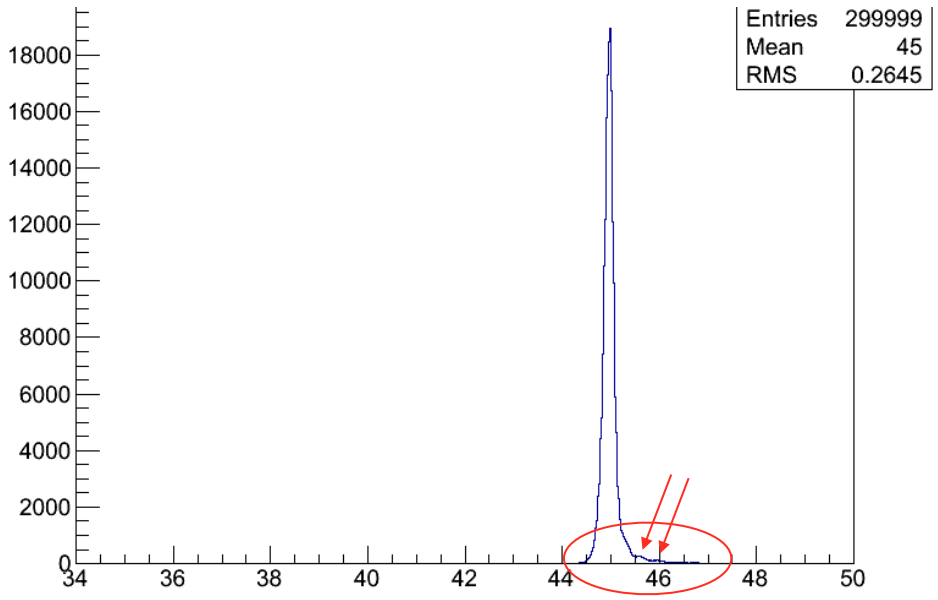


Figura 6.1: Efecto de "pedestal" en las mediciones

La forma de controlar este fenómeno se detalla más adelante, haciendo uso de *trigger* o tomando en cuenta sólo los datos con mayor amplitud. Es importante mencionar que la figura 6.1 representa su amplitud en función de ocurrencias de eventos y no de carga como la figura 6.2.

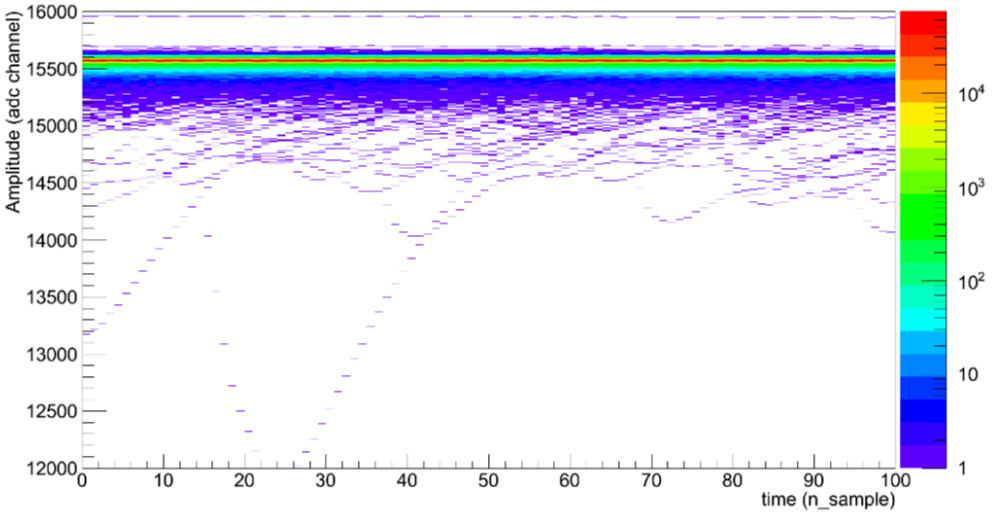


Figura 6.2: Medición de Dark Rate Canal 6

2. La siguiente etapa consiste en fijar un *trigger* arbitrario, reuniendo las señales y analizando los tiempos que tardan en depositar toda su carga. Como vemos en la figura 6.3, se asocia un tiempo de entre 40-60[nS] a cada señal, agrupándose un mayor número de datos con una amplitud menor.

   Este tipo de gráfico muestra una amplitud en unidades arbitrarias y la ocurrencia de los eventos, asociándose una mayor ocurrencia al color rojo y una menor al color morado, tal como se puede apreciar en la barra lateral derecha.

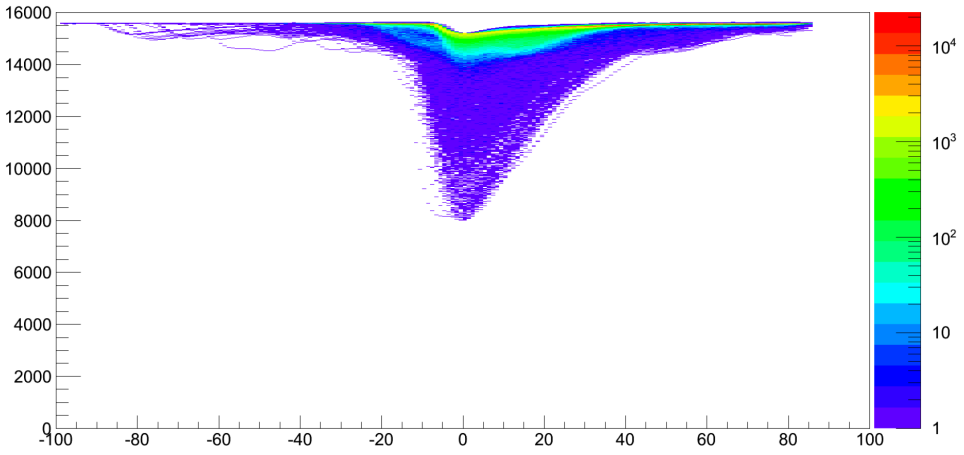


Figura 6.3: Medición Canal 6 con *trigger* arbitrario

3. Ya teniendo un análisis de cómo se distribuyen los datos, se procede a separar el pedestal del resto de las mediciones. Para esto se fijan distintos umbrales o *thresholds* que determinan dónde se encuentran los primeros foto electrones.

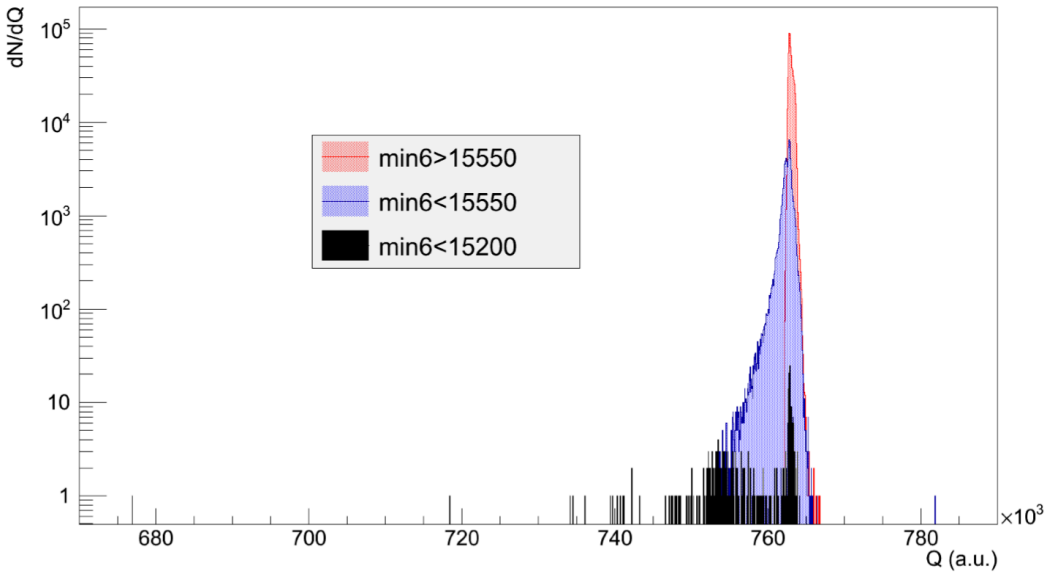


Figura 6.4: Gráfico de carga para el Canal 6

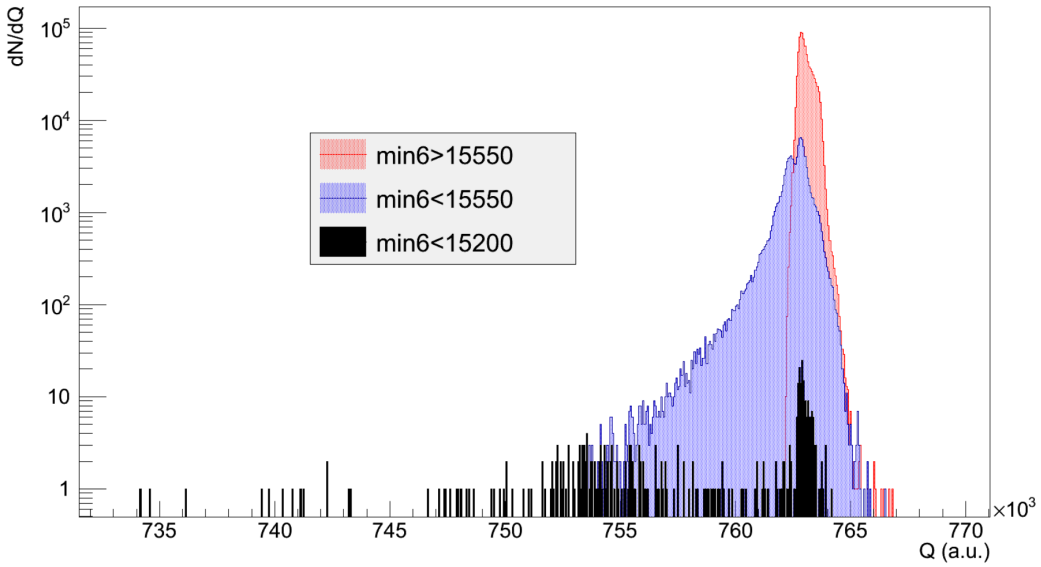


Figura 6.5: Zoom - Gráfico de carga para el Canal 6

En la figura 6.5 ya es posible apreciar cómo al fijar un *threshold* por debajo de los 15550 (a.u.)[6] el pedestal tiene un *rate* similar a los primeros foto electrones.

4. Ya definido el *threshold* a utilizar por los distintos canales se comienza a realizar coincidencia con algunos de éstos. La distribución asociada se muestra en la figura 6.6.

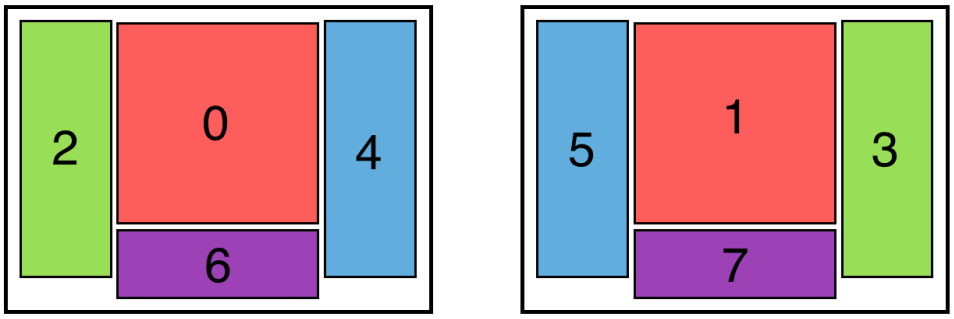


Figura 6.6: Distribución de los canales

[6] El concepto a.u. hace referencia a unidades arbitrarias, ya que no se han calibrado aún los cargas reales en función de los gráficos obtenidos por software.

Como se podría inferir, los colores representan un mismo detector (con su respectivo MPPC) visto desde cada extremo. Por especificaciones del *digitizer* utilizado (*CAEN DT5730*) es necesario parear los canales en los que se desea realizar coincidencia. Es decir, la coincidencia se realiza entre los canales 0-1,2-3,4-5 y 6-7.

5. Las primeras mediciones de coincidencia se realizaron a través del osciloscopio y luego se procedió a su ejecución por software (*ROOT* luego de la adquisición por el *digitizer*). Las figuras 6.7 y 6.8 muestran la estrecha correlación que existe entre las salidas del Canal 6 - Canal 7 y Canal 4 - Canal 5 respectivamente, fijando el *trigger* en uno de éstos para cada caso.

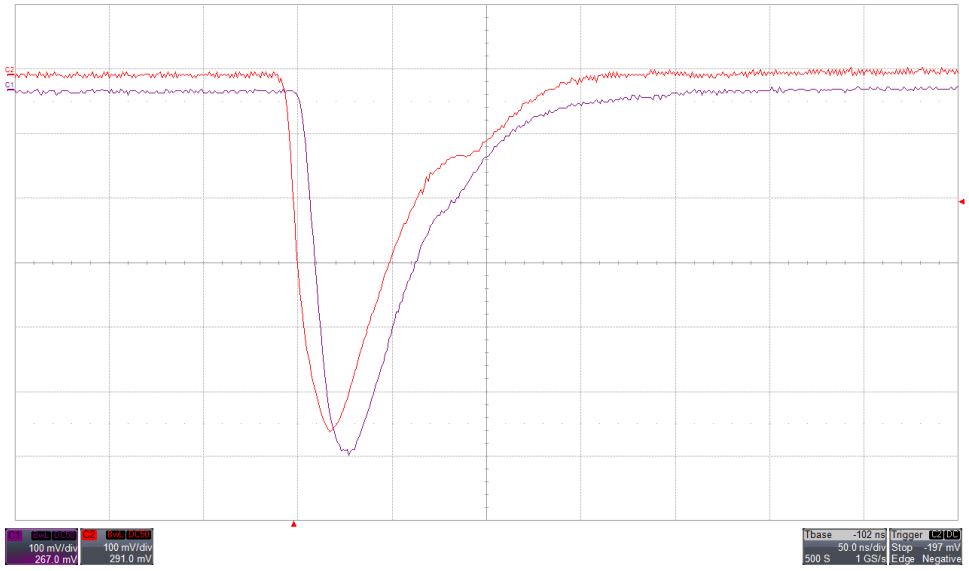


Figura 6.7: Coincidencia entre Canal 6 y Canal 7

A la vez, se realizó estudio de coincidencia entre los Canales 2-4 y 3-5, en los que no se esperaría ver frecuentemente la ocurrencia de coincidencia producto de la baja probabilidad de impacto de los muones en esa dirección (tienden a ser vertical o con pequeño ángulo). Los resultados

obtenidos con mayor frecuencia se muestran en la figura 6.9, donde la ocurrencia de señales simultáneas es muy poco frecuente.

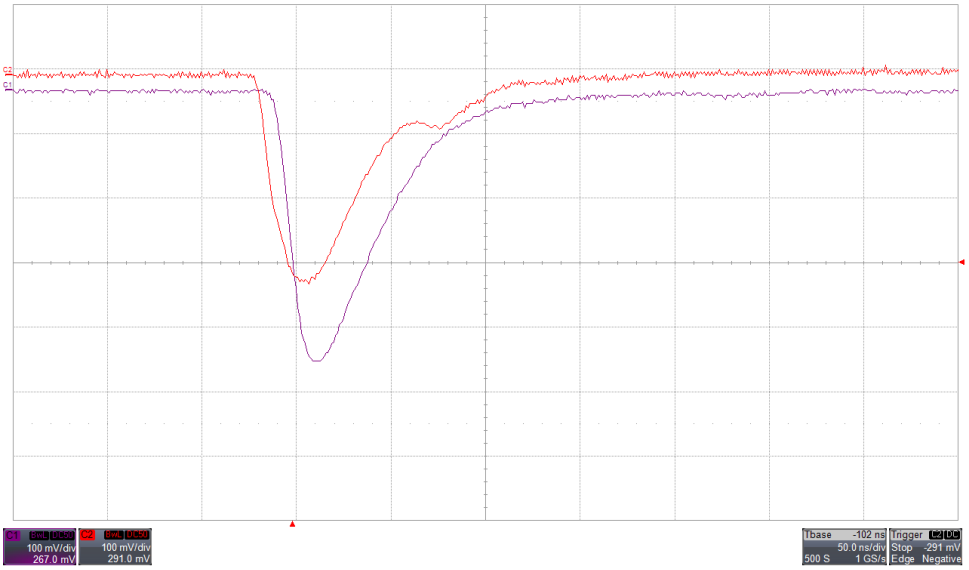


Figura 6.8: Coincidencia entre Canal 4 y Canal 5

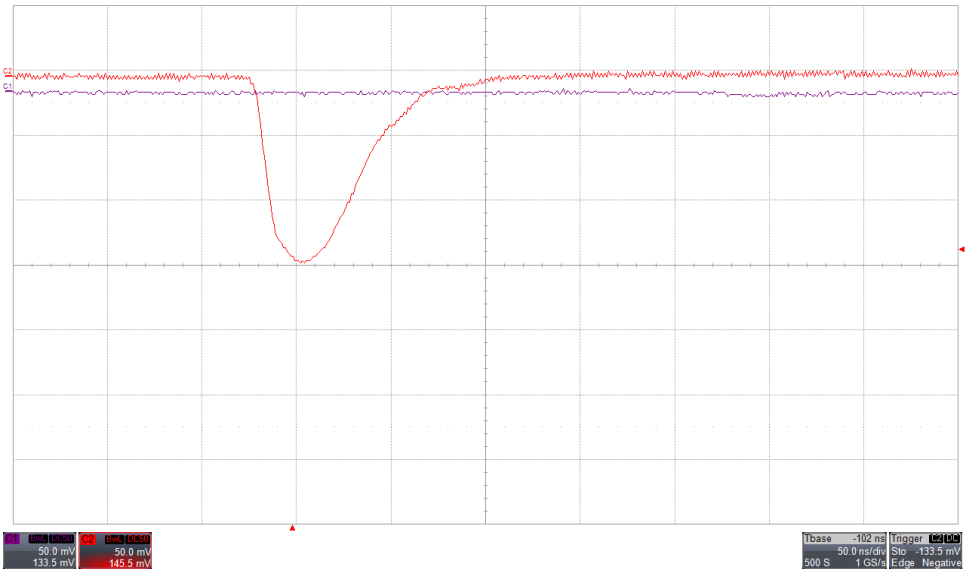


Figura 6.9: Coincidencia entre Canal 4 y Canal 5

6. A continuación se realiza coincidencia entre 2 canales, que en este caso fueron el Canal 0 y Canal 1 (los únicos susceptibles a la presencia de gas radón) y se buscó coincidencia, simultáneamente, con el Canal 6 o Canal 7. Lo interesante de esta medición es que en el caso de que se midan eventos tanto en los Canales 0 y 1 a la vez que en el Canal 6 o 7, se deduce que lo que se está detectando fue una medición de muón, mientras que si sólo se detectan datos en el canal 0 y 1, las mediciones obtenidas pueden corresponder en mayor probabilidad a la detección de radón (partículas alfa producto del decaimiento del gas).

   Se habla de "mayor probabilidad" ya que para tener certeza de que lo medido es radón, debe realizarse la coincidencia entre todos los canales apareados (0-1, 2-3, 4-5 y 6-7) y al mismo tiempo realizar una anticoincidencia de los últimos 3 pares o detectores secundarios en relación al detector principal (Canal 0-1).

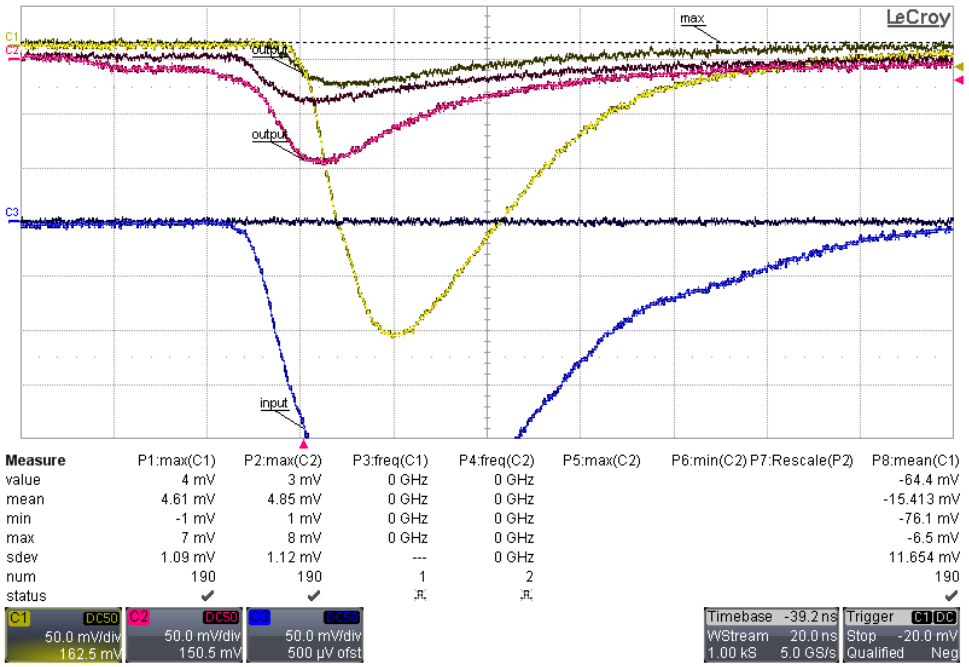


Figura 7.0: Coincidencia entre Canal 0-1 y Canal 6 - Posibilidad de radón

La figura 7.0 muestra la ocurrencia de una posible detección de radón, puesto que tanto el detector principal como alguno secundario ha tomado la medición al mismo tiempo, mientras que de la figura 7.1 se puede concluir que se está en presencia de muones.

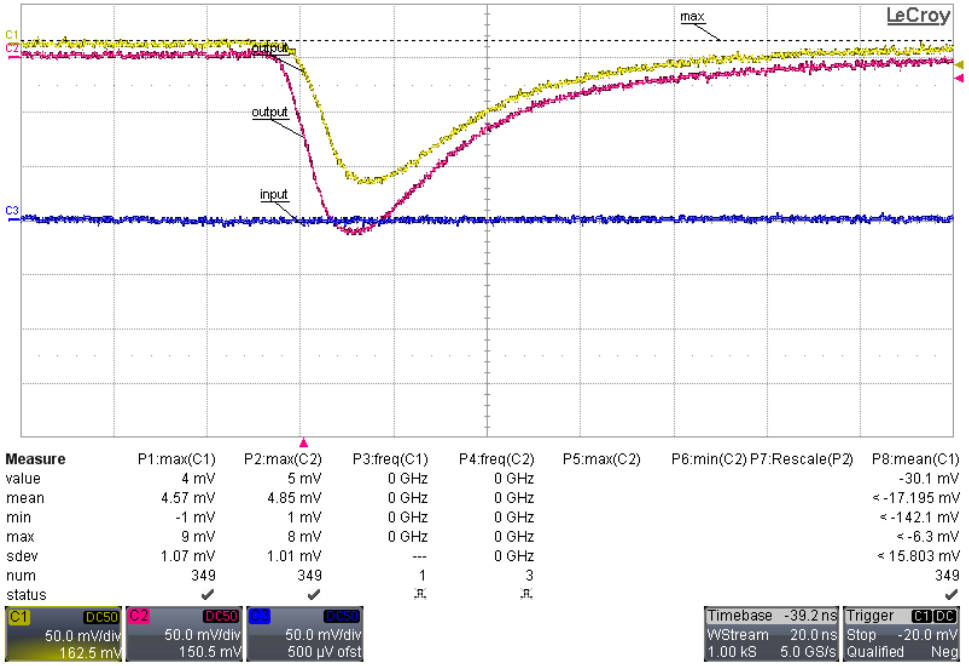


Figura 7.1: Coincidencia (Nula) entre Canal 0-1 y Canal 6 - Señal de muón

Para las mediciones en el *digitizer*, la ventana de tiempo considerada para asociarlo a una coincidencia se ha configurado en 4[nS], o sea, si se está realizando una correlación entre el canal 6 y 7, por mencionar un ejemplo, y ambos detectan una medición sobre un umbral establecido en un período de diferencia de 4[nS] entonces el software acepta la medición como un evento simultáneo entre ambos canales, en el caso contrario, sólo se procesa el dato como eventos independientes entre sí. Esto se realiza para tener certeza de que el evento desencadenado por una partícula alfa es el mismo y no corresponde a eventos casuales.

6.3 Introducción Artificial de Partículas Alfa (Pasos Siguientes)

El último paso por desarrollar, que no alcanzó a ser incluido en este documento y se encuentra en desarrollo, consiste en adquirir material radioactivo emisor de rayos alfa e introducirlo en el interior del detector. De este modo se podrá simular, con mucha similitud, los efectos que provoca el gas radón en un entorno de desarrollo real y conjeturar las mediciones que debiesen obtenerse.

Las partículas alfa introducidas artificialmente depositan una energía muy similar en los plásticos centelladores, dejando una "huella" o comportamiento a analizar mediante sus señales. Mientras que el radón de forma natural tiene una energía de desintegración de 5.59[MeV], las fuentes artificiales a introducir son de 5.25[MeV], variando solamente en un 6.08%.

Saber el comportamiento, en profundidad, de las partículas alfa es fundamental para lograr una correlación y calibración exitosa ya que se pretende independizar al detector de un adquisidor costoso como el *digitizer CAEN DT5730*, pero para poder materializar esto y dejar una unidad lógica de anticoincidencia con "AND" y "OR" se debe comprender sus efectos con el fin de programar todos los parámetros necesarios para lograrlo.

CAPÍTULO 7 - CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En el presente trabajo de titulación, se ha logrado construir un prototipo detector de gas radón, obteniendo resultados preliminares bastante prometedores de cara a los trabajos próximos que ya se encuentran realizando, con el propósito de poder dejar el prototipo midiendo un período prolongado de tiempo y realizar un análisis en profundidad de sus datos.

Para lograr la materialización de lo propuesto en un principio, fue necesario inmiscuirse en distintas áreas de trabajo, que abarcaron temas de interés como la física involucrada, el desarrollo, implementación y modificación de circuitos electrónicos, la investigación del gas radón junto con sus daños a la salud y posibles hipótesis de interés sobre la correlación con sismos, construcción, mecanizado y adquisición de todas las piezas y componentes necesarios para desarrollar el prototipo.

Dentro de las recomendaciones a versiones futuras, en lo que respecta a la electrónica, se pudo apreciar que la relación señal-ruido a la salida del MPPC era adecuada. Sin embargo la necesidad de implementar un cable que uniera los dos contactos del MPPC causó varios problemas producto de introducción de ruidos electromagnéticos en las señales, lo que se remedió parcialmente forrando los cables en cobre. Para solucionar esto será necesario reubicar la electrónica en la placa de tal modo que los contactos del MPPC queden directamente conectados a la placa. Dentro de la reubicación es recomendable realizar ciertos cambios en los valores de algunos componentes, como lo son las resistencias R4 y R5 del Amplificador de carga (sección 4.31) para lograr un rango de mayor dinamismo a la salida de la etapa de amplificación y generar un mayor rango de valores posibles en las mediciones, evitando que los pulsos de mayor amplitud se pierdan.

Con respecto a la estructura se debe pensar idealmente en confeccionar una pieza que sea capaz de cubrir a todo el detector, ya que al generar perforaciones para las uniones como se dio en el caso del presente prototipo, existe posibilidad de que existan filtraciones de fotones hacia el interior, a pesar de ser sellado con precisión. Del mismo modo se deben cambiar las tapas, por un metal aislante de ruidos electromagnéticos, ya que al realizar llamadas telefónicas cerca del prototipo, el espectro de señales se ve completamente saturado por el ruido generado. Esto es de vital importancia ya que los siguientes pasos deben considerar dejar al prototipo aislado en algún lugar de interés, el cual deberá estar enviando constantemente las mediciones a un servidor centralizado y la manera que se considera actualmente contempla el uso de dispositivos móviles con redes 3G/4G.

En relación a la ventaja que presenta este detector frente a lo que existe en el mercado, como se muestra en la sección 2, es claro notar que la gran diferencia que lo distingue es el costo, la superficie de detección, y la posibilidad de ser configurado libremente, posibilitando la implementación de su distribución en diversas zonas de interés y poder centralizar todos los datos generados en un servidor central que sea capaz de procesar la información en tiempo real.

La detección de radón para los fines expuestos, sismos y salud, presentan sólo una pequeña visión de lo que se podría hacer con el detector, ya que al distribuirlo geográficamente en puntos claves, los datos podrían ser de acceso público para que diversos científicos utilicen la información para los fines o estudios que estimen conveniente.

REFERENCIAS

[1] - Enlace Web: https://es.wikipedia.org/wiki/Radón

[2] - Enlace Web: https://en.wikipedia.org/wiki/Decay_chain

[3] - Enlace Web: https://www.atsdr.cdc.gov/csem/csem.asp?csem=8&po=5

[4] - Enlace Web: https://www.cancer.gov/about-cancer/causes-prevention/risk/substances/radon/radon-fact-sheet

[5] - Enlace Web: http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs291/es/

[6] - Enlace Web: https://en.wikipedia.org/wiki/Earthquake_prediction#Radon_emissions

[7] - Enlace Web: http://www.omicsonline.org/open-access/radon222-a-potential-shortterm-earthquake-precursor-2157-7617-1000282.php?aid=57605

[8] - Enlace Web: http://web.archive.org/web/20090409210635/espanol.news.yahoo.com/s/reuters/090406/internacional/internacional_sismo_italia_cientifico

[9] - Enlace Web: http://www.earthmagazine.org/article/earthquake-prediction-gone-and-back-again

[10] - Enlace Web: https://it.wikipedia.org/wiki/Giampaolo_Giuliani

[11] - Enlace Web: http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs291/es/

[12] - Enlace Web: http://www.durridge.com/products_rad7.shtml

[13] - Enlace Web: https://www.corentium.ca/ca_en/compare-models/

[14] - Enlace Web: http://www.rsens.it/en/products/

[15] - Enlace Web: https://www.lowes.com/pd/PRO-LAB-Radon-Gas-Test-Kit/4070097

[16] - Enlace Web: http://www.rssi.us/radon-alpha-track-radon-detector.htm

[17] - Enlace Web: http://www.radonzone.com/radon-detector.html

[18] - Enlace Web: http://radoncorp.com/testing/victoria-radon-alarm.php

[19] - Enlace Web: http://radoncorp.com/pdf/brochureAYKOWproductsweb.pdf

[20] - Enlace Web: https://en.wikipedia.org/wiki/Silicon_photomultiplier

[21] - Enlace Web: http://www.hamamatsu.su/images/hamam/katalogi/mppc_kapd0002e.pdf

[22] - Enlace Web: https://en.wikipedia.org/wiki/Cockcroft-Walton_generator

[23] - Enlace Web: https://www3.epa.gov/radtown/docs/radiation-exposure-activity2.pdf

[24] Toxicological profile for radon, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, U.S. Public Health Service, In collaboration with U.S. Environmental Protection Agency, December 1990

[25] J. H. Harley (1975). Noble gases. U.S. Environmental Protection Agency. pp. 109–114

[26] Sperrin, Malcolm; Gillmore, Gavin; Denman, Tony (2001). "Radon concentration variations in a Mendip cave cluster". Environmental Management and Health 12 (5): 476

[27] Cohen, Bernard, D.Sc. "Radon, A Homeowner's Guide to Detection and Control" Pub. Consumer's Union, New York 1987, ISBN 0-89043-227-9

[28] Steck, Daniel J.; Field, R. William; Lynch, Charles F. (1999). "Exposure to Atmospheric Radon"

[29] - Enlace Web: http://www.cchen.cl/transparencia/transparencia_2016/Ley%20en%20%20pdf/DecSup_3.pdf

[30] - Enlace Web: http://www.aviacion.cl/RadiacionCosmica/Limites_de_Radiacion_en_Chile.pps

ANEXO A - RADIACTIVIDAD

Las radiaciones, según su nivel de energía, se pueden clasificar en ionizantes y no ionizantes. En el caso que involucra al prototipo y la radiación asociada, se estudia y trabaja con la primera, siendo la gran diferencia entre una y otra que la radiación ionizante es de mayor energía (menor longitud de onda) y presenta la capacidad de arrancar electrones presentes en el átomo, mientras que la radiación del tipo no ionizante no es capaz.

Esta capacidad para arrancar electrones se denomina ionización, por ende el nombre que se le asocia (ionizante).

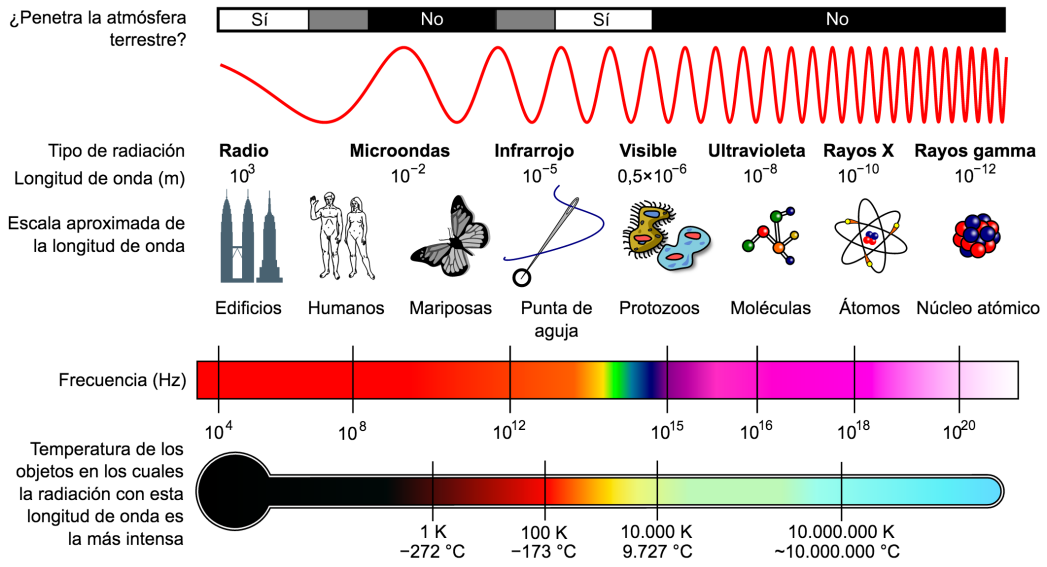


Figura A.1: Radiación por frecuencia y temperatura

URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM_Spectrum_Properties_es.svg

Hecha esta distinción, en adelante cuando se refiera a radiación se enfocará en la radiación ionizante.

El decaimiento radiactivo, también conocido como desintegración nuclear o la radioactividad, es el proceso por el cual el núcleo de un átomo inestable pierde energía y emite radiación en su proceso, la cual incluye partículas alfa, partículas

beta, rayos gamma y electrones de conversión. Un material que emite espontáneamente tal radiación se considera radiactivo.

La desintegración radiactiva es un proceso estocástico (es decir, al azar) a nivel de átomos individuales, en el que, según la teoría cuántica, es imposible predecir cuando un átomo en particular decaerá. La probabilidad de que un átomo dado decaerá nunca cambia, es decir, no importa cuánto tiempo ha existido el átomo y puede ser calculado a partir de sus constantes de desintegración medias o vidas medias. Las vidas medias de los átomos radiactivos no tienen límite inferior o superior conocido, puesto que abarcan un rango de tiempo de más de 55 órdenes de magnitud, desde un decaimiento casi instantáneo hasta de mucho más tiempo que la edad del universo.

Hay muchos tipos diferentes de desintegración radiactiva. Un decaimiento, o pérdida de energía desde el núcleo, se produce cuando un átomo con un tipo de núcleo, llamado el radionucleido padre (o radioisótopo padre), se transforma en un átomo con un núcleo en un estado diferente, o con un núcleo que contiene un número diferente de protones y neutrones. El producto se llama nucleido hijo y puede suceder que en algunos decaimientos, los padres y los nucleidos hijos sean diferentes elementos químicos, y por lo tanto los resultados del proceso del decaimiento proceden a la creación de un átomo de un elemento diferente. Esto se conoce como una transmutación nuclear.

En las desintegraciones radiactivas podemos identificar distintos tipos de radiación:

- Desintegración Alpha, es un tipo de desintegración radiactiva en el que un núcleo atómico emite una partícula alfa (núcleo de helio) y de este modo se transforma o decae en un átomo con un número másico y atómico reducido en cuatro y en dos respectivamente. Por ejemplo ^{238}Uranio se desintegra para formar a ^{234}Torio, emitiendo una partícula alfa en el proceso. Esta partícula tiene una energía cinética de 5 MeV (correspondiente al 0.13% de la energía total) y una velocidad de 15.000.000 m/s (cercano al 5% de la velocidad de la luz).

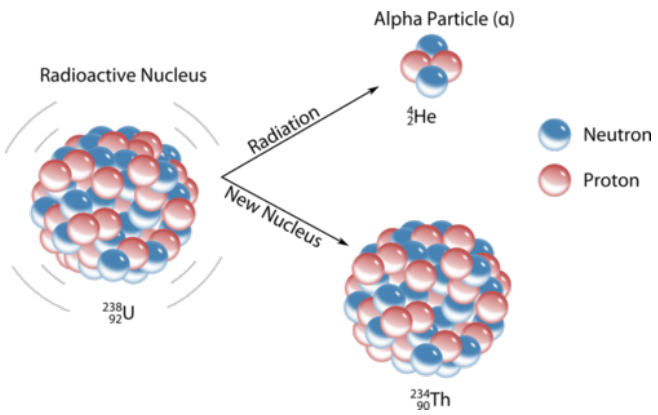


Figura A.2: Desintegración Alfa

URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alpha_Decay.svg

- Desintegración Beta, es un tipo de desintegración radiactiva en el que un protón se transforma en un neutrón, o viceversa, dentro de un núcleo atómico. Este proceso permite que el átomo se acerque más a la relación óptima de los protones y los neutrones. Como resultado de esta transformación, el núcleo emite una partícula beta, que es en definitiva un electrón o positrón. Existen dos tipos de desintegración beta, conocidos como beta menos (β^-) y beta más (β^+). En β^- se pierde un neutrón y aparece un protón, produciendo durante el proceso un electrón y un

antineutrino electrónico, mientras que en β^+ se pierde un protón y aparece un neutrón, produciendo durante el proceso un positrón y un neutrino electrónico.

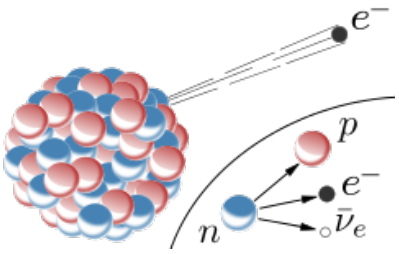


Figura A.3: Desintegración β^-

URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Beta-minus_Decay.svg

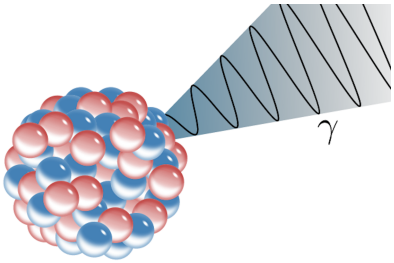


Figura A.4: Desintegración Gamma

URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gamma_Decay.svg

- Radiación Gamma, es un proceso de desintegración radiactiva que no resulta en una transmutación. La energía de un núcleo excitado es emitido como un rayo gamma (fotones) a través de radiación electromagnética.

La radiación puede ser absorbida por distintas sustancias en su camino, por ejemplo, la radiación alfa no puede pasar a través de los seres humanos, la radiación beta se detiene por el aluminio, mientras que la radiación gamma por el plomo, como muestra la figura A.5.

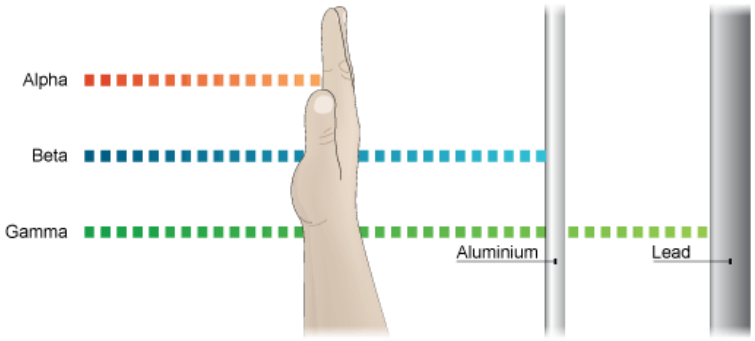


Figura A.5: Interacción de los tipos de radiación a distintos materiales

Actividad Radioactiva

La actividad radiactiva se define como el número de desintegraciones por segundo o el número de núcleos atómicos inestables que se desintegran por segundo en una muestra dada. La actividad se determina contando, con la ayuda de detectores de radiación y circuitos electrónicos, el número de partículas y fotones (radiación electromagnética) expulsados de un material radioactivo durante un intervalo de tiempo establecido.

En el SI (Sistema Internacional de Unidades) la actividad radioactiva se mide en Becquerel (Bq), donde 1[Bq] corresponde a 1 decaimiento por segundo. Este sucedió al Curie (Ci) y su relación está dada por la ecuación A.1:

$$1\ [\mathrm{Ci}] = 3.7 \cdot 10^{10}\ [\mathrm{Bq}] = 37\ [\mathrm{GBq}] \qquad \textbf{(ec A.1)}$$

La mayoría de la radiación proviene de fuentes naturales, por lo que existe un porcentaje considerable de radiación natural a la que estamos expuestos desde siempre y en forma natural. El siguiente gráfico, con datos obtenidos el 2009, muestra una proporción de las distintas fuentes a las que el humano está expuesto en el diario vivir, compuestas por: Radiación Natural 50% (gas Radón 37%, Radiación Cósmica 5%, Radiación por Ingestión 5%, Radiación Terrestre 3%) y Radiación Generada por el hombre 50% *[23]*.

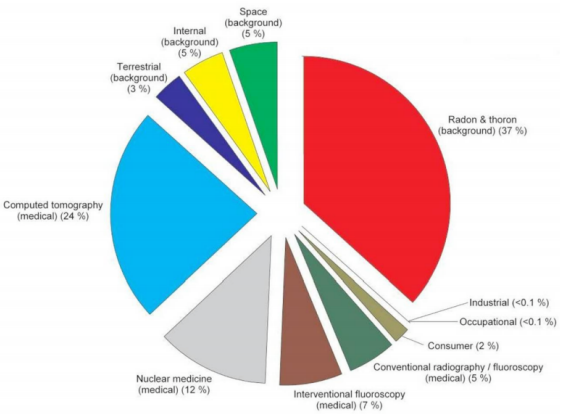


Figura A.6: Fuentes de radiación a las que está expuesta el humano

Dosis Absorbida

La dosis absorbida es una magnitud física que representa la energía media impartida a la materia por unidad de masa a través de la radiación ionizante. En el sistema internacional de unidades, la unidad de medida es julios por kilogramo, y su nombre es Gray [Gy]. A veces se usa también Rad, unidad predominantemente en Estados Unidos.

La dosis absorbida se utiliza en el cálculo de la absorción en tejidos vivos, tanto en la protección de radiación como en radiología.

Dosis Equivalente

La dosis equivalente representa los efectos probabilísticos de inducción de cáncer y daño genético en el cuerpo, producto de los niveles de radiación ionizante que se reciben. Se deriva de la dosis absorbida, pero también considera la eficacia biológica de la radiación, la cual puede variar según el tipo de radiación y la energía.

En el sistema internacional de unidades, la unidad de medida es julios por kilogramo, y su nombre es Sievert [Sv]. A veces se usa también Roentgen [Rem], unidad predominantemente en Estados Unidos, que equivale a 0.01[Sv].

Esta dosis se calcula utilizando la dosis absorbida media depositada en el tejido corporal u órgano en específico, multiplicado por el factor de ponderación de la radiación, el cual depende del tipo y la energía de la radiación en cuestión. El factor de ponderación de la radiación representa la eficacia biológica relativa de la radiación y modifica la dosis absorbida para tener en cuenta los diferentes efectos biológicos de varios tipos y energías de radiación.

En la siguiente imagen se puede observar la relación que existe entre los tipos de dosis mencionados en los párrafos anteriores:

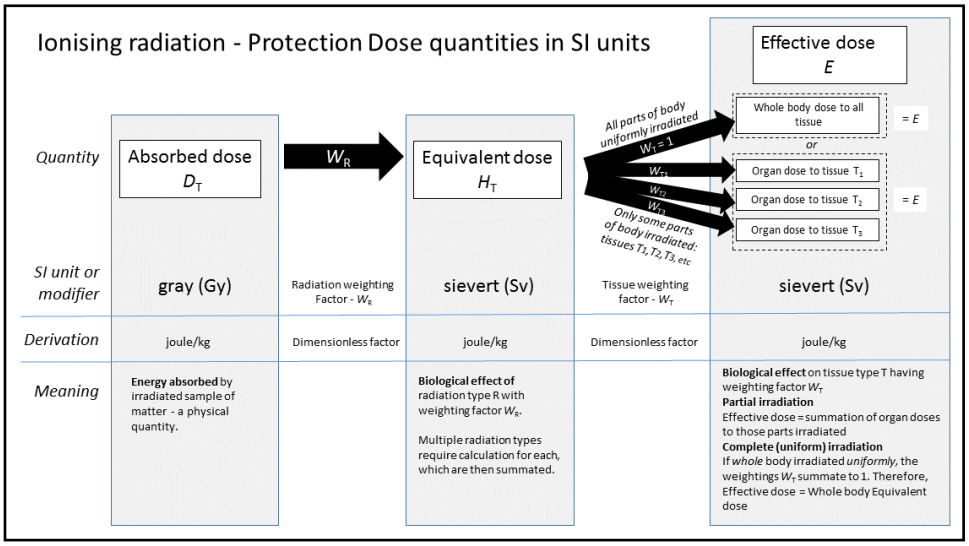


Figura A.7: Tipos de dosis en unidades SI (radiación ionizante)

ANEXO B - GAS RADÓN

El radón es un elemento químico con el símbolo de Rn y número atómico 86. Es un gas radiactivo, insípido, incoloro, inodoro, noble, de origen natural como un producto de la desintegración del radio. Su isótopo más estable, ^{222}Rn, tiene una vida media de 3,8 días. El radón es una de las sustancias más densas que sigue siendo un gas en condiciones normales. También es el único gas en condiciones normales que sólo tiene isótopos radiactivos, y se considera un peligro para la salud debido a su radiactividad.

Se forma como un paso intermedio en las cadenas de desintegración radiactiva normales a través del cual los elementos torio y el uranio se descomponen lentamente en plomo. Torio y uranio son los dos elementos radiactivos más comunes en la tierra que han existido desde que ésta se formó. Sus isótopos naturales tienen muy larga vida media, del orden de miles de millones de años, por lo que al desintegrarse en radio y luego éste en radón, podemos asumir que se seguirán produciendo durante decenas de millones de años en prácticamente las mismas concentraciones que lo hacen ahora *[24]*.

A medida que el radón se descompone, produce nuevos elementos radioactivos denominados ‘descendientes del radón’ o ‘productos de desintegración’. A diferencia del radón que está en estado gaseoso, sus descendientes son sólidos y se adhieren a las superficies, tales como partículas de polvo en el aire. Si se inhala como polvo contaminado, estas partículas se pueden adherir a las vías respiratorias de los pulmones y aumentar el riesgo de desarrollar cáncer de pulmón.

A diferencia de todos los otros elementos intermedios en las cadenas de desintegración antes mencionados, el radón es gaseoso y fácil de inhalar. Por lo tanto, es el principal responsable de la exposición a la radiación ionizante natural en la población. A menudo es el mayor contribuyente a la dosis de radiación de fondo de un individuo, dependiendo del lugar geográfico. A pesar de su corta vida, este gas

tiene la característica de acumularse en espacios angostos, debido a su densidad, tales como edificios, subterráneos o sótanos. También puede encontrarse en el agua, cuando ésta proviene de una fuente que tenga contacto con la tierra, como por ejemplo aguas de manantial y aguas termales.

Hábitat natural del Radón

El radón se produce por la desintegración radiactiva del radio ^{226}Ra, que se encuentra en los minerales de uranio, mineral de fosfato, rocas ígneas como el granito, y en menor grado, en las rocas comunes, tales como piedra caliza. Cada 2,6 km^2 de la superficie del suelo, a una profundidad de 15 cm (1 milla cuadrada a una profundidad de 6 pulgadas), contiene aproximadamente 1 gramo de radio, que libera gas radón en pequeñas cantidades a la atmósfera. En una escala mundial, se estima que 90 TBq de radón se liberan del suelo anualmente *[25]*.

La concentración de radón varía de un lugar a otro, al aire libre se puede encontrar en concentraciones de entre 1 a 100 Bq/m^3, mientras que por encima del océano en niveles inferiores a los 0,1 Bq/m^3. En cuevas, o casas con sistemas de ventilación precarios, su concentración se eleva en el rango de 20-2.000 Bq/m^3 *[26]*, mientras que en contexto de minería la concentración puede elevarse aún más. A nivel mundial, un promedio de aproximadamente dos átomos de radón son emitidos por cada centímetro cuadrado de suelo en la Tierra cada segundo de cada día *[27]*. Es por ello que prácticamente todas las casas o lugar habitable en el planeta siempre han estado y estarán en presencia de radón, por ende, es factible afirmar que los seres humanos han estado respirando el gas desde los albores del hombre.

Siendo un gas que normalmente se desplaza libremente a través de las fallas y los suelos fragmentados, y puede acumularse en las cuevas o agua, su corta vida juega un rol fundamental, ya que con su vida media de cuatro días (^{222}Rn), la concentración de radón disminuye rápidamente desde la zona de emanación hasta la superficie.

También se ha demostrado que la concentración del gas varía con la estación y las condiciones atmosféricas, logrando mayores niveles en el aire si hay una inversión térmica y poco viento *[28]*.

Efectos adversos producto de la inhalación de gas Radón

Durante la descomposición del radón, se libera una partícula alfa y el átomo se transmuta en el polonio. Es en este punto donde se encuentran los peligros reales asociados con el radón, porque no es directamente el radón el responsable de los problemas de salud, sino más bien la corta vida que presentan sus hijos dentro de la cadena de desintegración y la nueva emisión de partículas alfa asociados a estos eventos.

Hay varios tipos diferentes (isótopos) de origen natural del radón. Por lo general, cuando se habla de radón, se hace referencia a ^{222}Rd, que tiene una vida media de 3,8 días. Esto significa que si un volumen de radón se sella en un recipiente, un medio del radón decaerá en cuatro días. Después de ocho días, sólo permanecerá el 25% de la concentración original, después de 12 días sólo el 12,5% y así sucesivamente.

Una vez que el átomo de radón se descompone, el proceso de desintegración continúa, decayendo el ^{218}Polonio en ^{214}Plomo, el cual decae a su vez en ^{214}Bismuto (a través de β^-), que a su vez decae en ^{214}Polonio (a través de β^-). Cada uno de estos hijos tiene una vida media de menos de 30 minutos (el ^{214}Polonio tiene una vida media de sólo 0,00016 segundos).

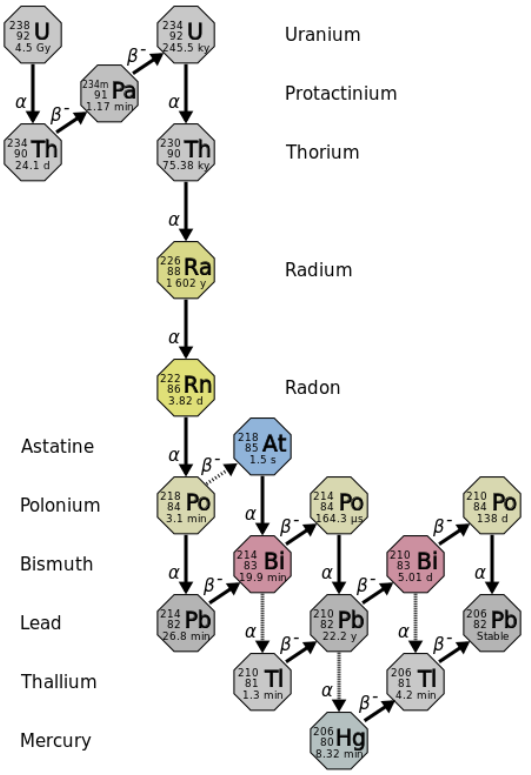


Figura B.1: Cadena de desintegración del Uranio

URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Decay_chain(4n%2B2,_Uranium_series).svg

Durante cada descomposición, al menos uno de los tres tipos de radiación ionizante son emitidos por los hijos del radón: alfa, beta ($^-$ ó $^+$) y gamma. La partícula alfa se detiene fácilmente por una sola pieza de papel o capa de ropa, lo que conlleva a que la transferencia de energía al material que ha detenido la partícula sea prácticamente total. Las partículas beta tienen menos probabilidad de ser detenidas e imparten, por ende, menos energía en el material de parada, mientras que la radiación gamma tiene una probabilidad aún menor de ser detenida.

Dado que el radón está en el aire, estos hijos tienen una alta probabilidad de estar también en este medio y si es que el radón al momento de descomponerse se encuentra en el interior del pulmón, el revestimiento de la pared pulmonar será el que

recibirá la totalidad de la energía generada al detener a las partículas. Dado que las células alveolares de la pared de pulmón no tienen un revestimiento protector significativo, una partícula alfa puede chocar con la célula viva, impartiendo una enorme cantidad de energía a la célula, posiblemente alterando el ADN dentro de la célula. Si los mecanismos de reparación del ADN del cuerpo fallan, la célula puede codificar la información de forma incorrecta o, por otro lado, pueden generar células "indiferenciadas" (carecen de la disposición ordenada normal de las células de las que surgen), interacción que se piensa puede iniciar los cánceres asociados.

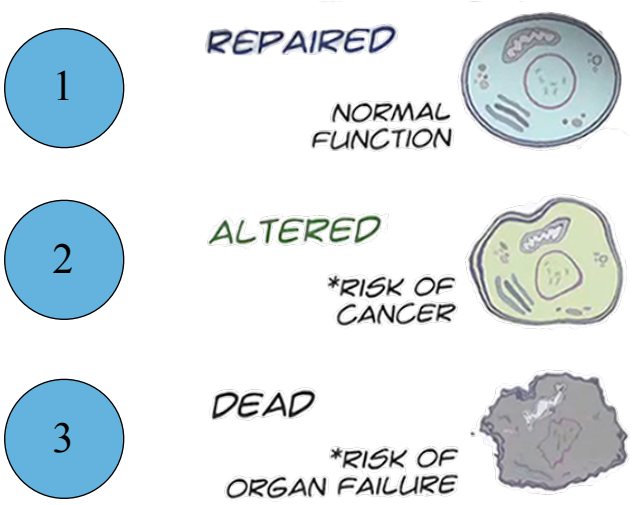


Figura B.2: Posible estado celular luego de la radiación

1.- La célula tiene la capacidad de repararse por si misma y volver a su estado de funcionamiento normal.

2.- El daño celular no se repara o se repara de forma incorrecta, por lo que la composición de la célula cambia. Este cambio puede eventualmente conducir al desarrollo de un cáncer.

3.- Hay daño irreparable en la célula, por lo que esta muere (la muerte celular no es siempre una mala opción).

Si unas pocas células dañadas por la radiación mueren, el cuerpo tiende a recuperarse y se minimiza el riesgo de desarrollar células potencialmente cancerígenas. Por otro lado si existe una muerte de células generalizada, como la causada por altas dosis de radiación, se puede conducir a una insuficiencia en los órganos e incluso, en última instancia, llegar a la muerte.

Cuando un hijo del radón está en el aire tiene una mayor probabilidad de adherirse a otras partículas presentes en el aire y el polvo, producto de la carga eléctrica asociada. Al adherirse un hijo a una partícula en suspensión, se dice que está “conectado" y tiene sólo alrededor de un 3% de probabilidad de adherirse a la mucosa pulmonar. En cambio al no estar “conectado”, tiene un 50% de golpear y adherirse a las paredes del pulmón; aumentando las posibilidades de una colisión entre una partícula alfa y una célula del órgano *[27]*.

Normativas de exposición a la radiación

Distintos países y organizaciones cuentan con estándares y normas que definen los límites seguros de radiación ionizante a los que la población puede estar expuesta para no provocar problemas médicos. Dentro de la población se puede distinguir a dos grupos, siendo el primero quienes trabajan con la radiación y quienes reciben radiación de forma esporádica, en otras palabras el público general.

Normativas en Chile

De acuerdo al Decreto Nº3, de 3 de enero de 1985 *[29]*, Chile reglamenta los siguientes límites (en dosis anuales) que puede recibir una persona según su grupo:

Trabajadores Expuestos	**50 [mSv / año]**
Mujeres en edad de procrear	< 12.5 [mSv / semestre]

Mujeres embarazadas	< 5 [mSv / período de gestación]
Público General	**5 [mSv / año]**

Figura B.3: Tabla de dosis permitidas por la ley en Chile

Normativas vigentes en el Mundo

A través de la Comisión Internacional de Protección a la Radiación (ICRP) *[30]*, se establecen los límites de radiación aceptables para trabajadores expuestos y público general:

Trabajadores Expuestos	**20 [mSv / año]**
Mujeres en edad de procrear	< 20 [mSv / semestre]
Mujeres embarazadas	< 2 [mSv / período de gestación] < 0.5 [mSv / mes]
Público General	**1 [mSv / año]**

Figura B.4: Tabla de dosis permitidas por la ICRP