



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Operación y valoración del sistema de
adquisición de datos del Monitor de
Neutrones de la Ciudad de México**

TESINA

Que para obtener el título de
Ingeniero Eléctrico Electrónico

P R E S E N T A

Roberto Alejandro Taylor Espinosa

DIRECTOR DE TESINA

Dr. Luis Xavier González Méndez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL**
(Titulación con trabajo escrito)



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado OPERACION Y VALORACION DEL SISTEMA DE ADQUISICION DE DATOS DEL MONITOR DE NEUTRONES DE LA CIUDAD DE MEXICO que presenté para obtener el título de INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

ROBERTO ALEJANDRO TAYLOR ESPINOSA
Número de cuenta: 302574504

Dedicatoria

A mis padres, por su sacrificio, amor incondicional y sus enseñanzas de perseverancia y honestidad mediante el ejemplo.
A mis hermanos, sobrino y cuñado, porque su presencia me ha inspirado.
A mis amigos, por creer en mí en todo momento.
A todas las personas que, queriendo o no, me han ayudado a seguir este camino.

Agradecimientos

Agradezco profundamente a mi asesor, el Dr. Luis Xavier González Méndez por su apoyo, paciencia y consejos durante el desarrollo de este trabajo.

Mi más profunda gratitud al Dr. José Francisco Valdés-Galicia por darme la oportunidad de trabajar en su grupo de investigación y contribuir en mi formación académica.

Extiendo mi agradecimiento a los miembros del jurado, por dedicar su valioso tiempo a la revisión de este trabajo, al Dr. Pablo Pérez Alcazar, al M.I. Jesús Álvarez Castillo, al M.I. Ricardo Mota Marzano y al Ingeniero Jesús María Francisco Hernández Morales. Una mención especial al M.I. Ricardo Mota Marzano por permitirme utilizar su estación de soldadura durante el desarrollo del prototipo.

Mi sincera apreciación a la Dra. Rocío García y al Dr. Marcos Anzorena por sus consejos y apoyo durante la operación del sistema de adquisición.

Quiero agradecer al Dr. Ernesto Ortiz y al Dr. Oscar Morales por resolver mis dudas en los temas de rayos cósmicos.

Un agradecimiento especial al Ingeniero Octavio Musalem y al Físico Alejandro Hurtado, por sus consejos y apoyo que ayudaron a mejorar el sistema de adquisición.

Mi sincero reconocimiento a los Ingenieros Daniel Rodríguez y Miguel Ángel García, quienes me apoyaron en todas mis dudas de computación.

Agradezco a la base de datos del NMDB (www.nmdb.eu), fundada bajo el programa FP7 de la Unión Europea (contrato no. 213007) por los datos proporcionados.

Se agradece a la Universidad de Wisconsin–River Falls por proporcionar los datos del monitor de neutrones del Polo Sur; al Departamento de Física de la Universidad Nacional y Kapodistriaca de Atenas por proporcionar los datos de su monitor de neutrones; a la colaboración INAF/IFSI-UNIRoma por proporcionar los datos del monitor de neutrones de Roma, y al Observatorio Geofísico Sodankyla de la Universidad de Oulu (<https://cosmicrays oulu.fi>) por los datos proporcionados.

Introducción	II
1. Rayos cósmicos	1
1.1. Historia de los rayos cósmicos	1
1.2. ¿Qué son los rayos cósmicos?	4
1.2.1. Rayos cósmicos y la Tierra	5
2. El monitor de neutrones	7
2.1. Contadores proporcionales	9
2.1.1. Características del detector NM64	10
2.2. El monitor de neutrones de la Ciudad de México	10
3. Diseño de las tarjetas de circuito impreso	13
3.1. Breve historia de la fabricación de circuitos impresos	13
3.2. Pasos en el diseño de PCBs	14
3.2.1. Diagrama esquemático	15
3.3. Diseño de PCBs del NDAQ	17
3.3.1. Recomendaciones generales aplicadas en el diseño	21
3.3.2. Placas de circuito impreso	22
4. Análisis de datos	29
4.1. Series de tiempo de neutrones	29
4.2. Regresión lineal y correlación	32
4.3. Histogramas de error absoluto	34
4.4. Gráfico Bland-Altman	36
4.5. Gráfico cuantil cuantil	37
4.6. Prueba χ^2	40
4.7. Comparación de datos con respecto a otros monitores de neutrones	42
4.8. Conclusiones	44
4.9. Trabajo futuro	44

A. Apéndice A	50
A.1. Gráficas de regresión lineal	52
A.2. Gráficas de error absoluto	54

La radiación cósmica ha estado presente durante toda la historia de la Tierra y su estudio es fundamental para la comprensión del Universo. Podemos contar entre los instrumentos que se han utilizado para medir esta radiación, al electroscoio, que desde el siglo XVIII ha sido utilizado en experimentos de electricidad y magnetismo; a las cámaras de niebla, con las cuales se lograron ver las trayectorias de partículas cargadas dentro de un campo eléctrico muy intenso; a los detectores rellenos con gas, los cuales siguen usándose en la actualidad; hasta detectores más sofisticados basados en semiconductores.

Aunque el tamaño, eficiencia y el principio de funcionamiento difiera entre los tantos detectores de radiación, todos necesitan de un sistema de adquisición de datos. La electrónica asociada a los sistemas de adquisición depende de las características de cada detector y, en general, el sistema de adquisición contabiliza un pulso de corriente o de voltaje y guarda junto con una estampa de tiempo la información para que más tarde pueda ser analizada.

En la actualidad, la gran mayoría de aparatos electrónicos hacen uso de circuitos impresos, los cuales sirven para llevar las señales a donde se necesiten de forma ordenada y confiable. Aunque el uso de circuitos impresos empezó a mediados del siglo pasado, su evolución ha sido rápida, llegando a ser una de las industrias fundamentales de la era moderna.

El nuevo sistema de adquisición de datos del Monitor de Neutrones de la Ciudad de México (MN-CDMX) integra estos principios mediante el diseño de placas de circuito impreso de doble cara, asegurando la integridad de las señales y un rendimiento robusto para la detección continua de partículas.

Para validar el desempeño del nuevo sistema, se llevó a cabo una comparación frente al sistema anterior, mediante el análisis de series de tiempo, regresiones lineales y diagramas de Bland-Altman. Con pruebas de normalidad (gráficos QQ y χ^2), se demostró congruencia estadística y estabilidad en la tasa de conteos de los datos.

También, se llevó a cabo una validación empírica a través de la red mundial de monitores de neutrones (NMDB), con la cual se confirmó que con el cambio del sistema de adquisición de datos, el Monitor de Neutrones de la Ciudad de México sigue de manera fiel las tendencias globales de la radiación cósmica.

CAPÍTULO 1

Rayos cósmicos

Como en muchos campos de la ciencia, el inicio del estudio de los rayos cósmicos (RC) se dio gracias a la búsqueda de explicaciones de otros fenómenos y para los RC en particular, puede explicarse gracias a la intersección en el estudio de la electricidad atmosférica y a la búsqueda del origen de una radiación ionizante presente aún en ambientes aislados.

1.1. Historia de los rayos cósmicos

El estudio de la ionización del aire tuvo principalmente su origen gracias a experimentos realizados por Charles Augustine de Coulomb a finales del siglo XVIII, cuando con un electroscoipo, como el de la Figura 1.1, descubrió que este puede descargarse debido a la acción del aire y no a algún fallo en el aislamiento.

Michael Faraday confirmó los resultados de Coulomb en 1835 y en 1879, William Crookes pudo medir que la velocidad de descarga del electroscoipo decrece cuando la presión del aire se reduce. Por lo tanto, la causa de la descarga del electroscoipo se debía a la ionización del aire [8]. En consecuencia, el estudio pasó a tratar de determinar qué es lo que causaba la ionización del aire.

Con el descubrimiento de la radiación espontánea por Henri Becquerel en 1896 y los descubrimientos de Marie y Pierre Curie sobre el decaimiento radiactivo en los elementos Polonio y Radio, llegó a observarse que en presencia de material radiactivo un electroscoipo rápidamente se descarga. La razón de descarga del electroscoipo se usó para determinar el nivel de radiactividad.

En un experimento en 1899, por Julius Elster



Figura 1.1: Electroscoipo de finales del siglo XVIII [8]

y Hans Geitel, en el cual aislaron un electroscopio al meterlo en una caja metálica gruesa y libre de impurezas radiactivas, notaron una reducción de la ionización, con lo que concluyeron que la descarga era principalmente debido a agentes ionizantes provenientes de fuera de la caja y que estos eran muy penetrantes. Se proponían tres posibles orígenes de esta radiación ionizante: 1) que provenía del suelo (corteza terrestre), 2) debido a agentes ionizantes en la atmósfera, o 3) de origen extraterrestre. La hipótesis más aceptada era que el origen se debía a materiales radiactivos presentes en la superficie terrestre.

Durante los siguientes años se hicieron varios experimentos tratando de confirmar el origen de esta radiación. En 1901, Charles T.R. Wilson propuso que la radiación debía ser de origen extraterrestre y en su experimento trató de medir una reducción en la radiación al llevar su electroscopio dentro de un túnel, pero debido a incertidumbres experimentales no pudo medir esta reducción. Durante la primera década del siglo XX, los experimentos que buscaban el origen de la radiación sólo llegaron a la conclusión de que existía una radiación de fondo y que parecía venir de todas direcciones.

El padre Theodore Wulf mejoró el electroscopio y lo hizo más transportable que los disponibles hasta entonces y durante sus experimentos en 1909 y 1910, llevó a cabo mediciones en la torre Eiffel (altura de 300 metros), con los cuales buscaba demostrar que el origen de la radiación venía del suelo, pero los resultados que obtuvo lo sorprendieron ya que, aunque había una reducción en la tasa de ionización, ésta era muy pequeña para confirmar la hipótesis.

Entre 1907 y 1912, Dominic Pacini realizó una serie de experimentos a nivel del mar, tanto en tierra firme como a varios kilómetros alejado de la costa, encontró resultados similares en ambas condiciones y concluyó que el origen de la radiación no podía provenir del suelo ya que sus resultados no podrían ser posibles. En 1911, diseñó un experimento en el que midió la tasa de ionización tres metros bajo el agua y encontró una reducción de la ionización cercana al 20 % en comparación con la superficie. De este experimento, concluyó que el agua absorbía radiación proveniente del exterior, por lo que existía una causa de ionización en la atmósfera independiente de las sustancias radiactivas de la superficie terrestre [5].

En 1909, durante un primer vuelo en globo que buscaba el origen de la radiación, Karl Bergwitz encontró una reducción en la ionización de 24 % a 1300 metros; sin embargo, sus resultados fueron cuestionados debido a que su electrómetro fue dañado durante el vuelo. Más tarde, al revisar sus instrumentos en el suelo y con algunas mediciones más, concluyó que no había observado una reducción significativa. También, en 1909, Albert Gockel realizó mediciones en globo hasta 3000 metros de altura durante tres vuelos sucesivos y no encontró una disminución como se esperaba suponiendo que el origen de la radiación era terrestre. Si Gockel hubiera continuado sus mediciones a mayores alturas, podría haber encontrado que la radiación aumentaba. Sin embargo, con sus resultados pudo concluir que: *«una parte no despreciable de la radiación penetrante es independiente de la acción directa de las sustancias radiactivas en las capas superiores de la corteza terrestre»* [8], confirmando así las conclusiones de Pacini.

Aún con los resultados de los experimentos de Pacini, de Wulf y de Gockel, la hipótesis del origen terrestre de la radiación no fue abandonada.

El inicio formal del estudio de los RC se establece cuando Victor F. Hess realizó

una serie de vuelos en globo aerostático entre 1911 y 1912, durante estos vuelos encontró que, después de pasar por un mínimo, la ionización incrementa conforme a la altura. Durante su último vuelo, que llegó hasta los 5200 metros, encontró que la radiación era un poco más del doble que en la superficie. Con estos resultados, Hess concluyó que el incremento en la ionización era debido a radiación que venía desde arriba, por lo que pensó que el origen era extraterrestre, estos experimentos lo hicieron acreedor al premio Nobel en 1936.

Más tarde, Werner Korlhörster confirmó los resultados de Hess en una serie de vuelos en los que llegó hasta los 9200 metros de altura. Aún con los resultados de Hess y Korlhörster (resumidos en la Figura 1.2, seguía habiendo físicos que no aceptaban el origen extraterrestre de la radiación, atribuyendo la causa de la ionización a elementos radiactivos en la atmósfera.

Robert A. Millikan junto con Ira S. Bowen realizaron vuelos en globo llegando hasta los 15 000 metros de altura en el estado de Texas, EUA, y descubrieron que la intensidad de la radiación no era comparable a la reportada por Hess y Korlhörster. Concluyeron que, la radiación penetrante era de origen local, sin saber que existía un efecto geomagnético entre las mediciones en Europa y Texas. Fue hasta 1926 que Millikan y G. Harvey Cameron con experimentos de absorción de radiación a distintas profundidades en lagos a gran altitud concluyeron que la radiación eran rayos gamma de alta energía que viajan en el espacio en todas direcciones llamándoles *rayos cósmicos*.

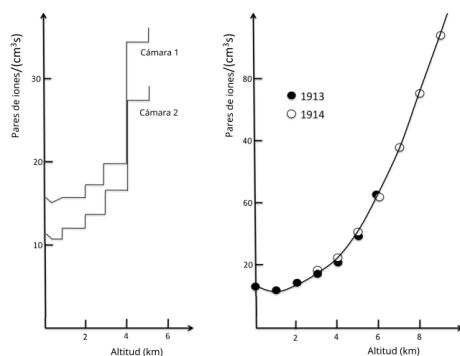


Figura 1.2: Gráficas que muestran los resultados de los experimentos de Hess y Korlhörster. Hechas por De Angelis [5]

En consecuencia de que la hipótesis del origen extraterrestre de la radiación fue más aceptada, los experimentos que se realizaron posteriormente fueron para determinar la naturaleza de esta radiación. Con la introducción del contador Geiger-Müller y una técnica de coincidencia desarrollada por Korlhörster, se pudo confirmar que la radiación cósmica es en gran medida de naturaleza corpuscular.

En 1932, Arthur Compton realizó experimentos alrededor del mundo encontrando una relación con la latitud, lo que demostraba que los RC son mayormente partículas cargadas. En 1933, experimentos independientes realizados por el equipo de Álvarez y Compton, Johnson y Rossi, descubrieron que un flujo mayor de RC llegaba desde el oeste que del este cerca del ecuador, debido a la interacción con el campo magnético de la Tierra, demostrando que los RC son mayormente partículas cargadas positivamente.

Durante esta misma época, Carl D. Anderson realizaba fotografías de trazas de RC en una cámara de niebla, donde encontró una traza que parecía tener las características de carga de un protón, pero que no podía tener una masa muy diferente a la de un electrón y lo llamó electrón positivo (positrón, ver Figura 1.3) [3]. El descubrimiento del positrón y un poco más tarde de partículas subatómicas como el muón, el mesón y el pión abrió el campo de la física de partículas, que tuvo su

origen con los RC. Y aunque el enfoque para encontrar nuevas partículas migró del estudio de RC a los aceleradores de partículas, durante varios años la confirmación y detección de nuevas partículas, como los neutrinos se hicieron mediante los RC, por lo que su estudio ha sido fundamental.

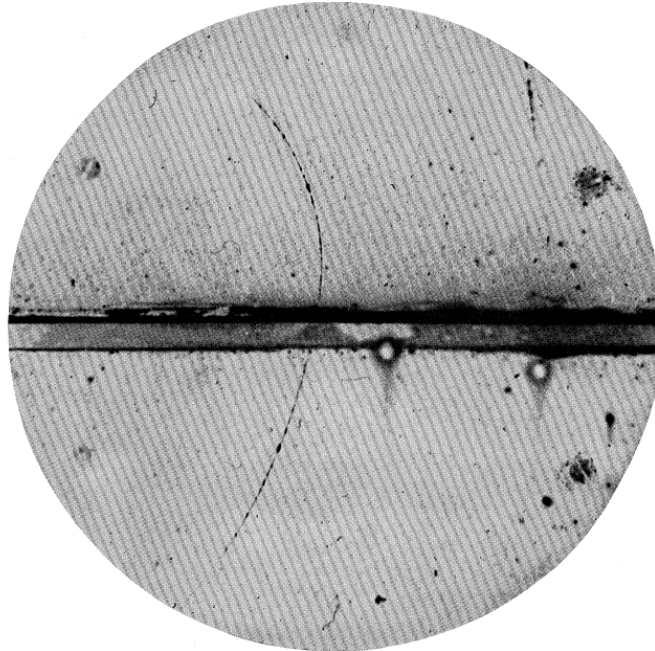


Figura 1.3: Traza de un positrón en una cámara de niebla [3]

1.2. ¿Qué son los rayos cósmicos?

Los rayos cósmicos (RC) son principalmente partículas cargadas muy energéticas que llegan a la Tierra provenientes de todas direcciones. Se componen de protones (núcleos de hidrógeno) que conforman cerca del 90 %, seguidos de núcleos de helio (partículas α) con cerca del 10 % y el resto son núcleos más pesados, electrones, positrones y rayos gamma $< 1\%$ [7]. La energía de estas partículas que llegan a la Tierra va desde algunos MeV hasta 10^{21} eV, el número de partículas que llega varía, desde las decenas de miles por metro cuadrado por segundo para las de menor energía, hasta menos de una partícula por kilómetro cuadrado por siglo para las más energéticas.

De acuerdo con Lev Dorman [9], se puede clasificar a los RC según su origen:

- **extragalácticos:** de muy alta energía ($10^{18} - 10^{21}$ eV), son generados en radiogalaxias, cuásares, y otras fuentes poderosas del Universo;
- **galácticos:** con energías de $10^{11} - 10^{17}$ eV, son generados principalmente por explosiones de supernovas o por los remanentes de una supernova, en la magnetósfera de pulsares y estrellas binarias, entre otros objetos dentro de nuestra galaxia;

- **solares:** con energías de hasta $10^{10}eV$, se generan en la corona solar durante erupciones solares fuertes;
- **interplanetarios o anómalos:** de energías que van de 10 – 100 MeV, se generan por ondas de choque terminales en el borde de la heliósfera o por ondas de choque interplanetarias poderosas;
- **magnetosféricos (o planetarios):** con hasta $10MeV$ para Júpiter y Saturno, o hasta $30keV$ para la Tierra, se generan dentro de la magnetósfera de planetas magnéticos que rotan.

La clasificación que hizo Dorman, se basa en la energía de las partículas y los procesos que pueden generarlas, ya que se sabe que estrellas como nuestro Sol no son capaces de producir partículas de más de $10^{10}eV$, por lo que el origen de estas deben ser de fuera de nuestro Sistema Solar.

1.2.1. Rayos cósmicos y la Tierra

A los rayos cósmicos que entran en la atmósfera terrestre se les conoce como rayos cósmicos primarios (**RCP**), pueden interaccionar con los átomos atmosféricos y producir rayos cósmicos secundarios o radiación cósmica secundaria (**RCS**), que puede ser detectada en la superficie terrestre. La energía mínima que una partícula incidente en la atmósfera debe tener para poder ser detectada a nivel de superficie es de $450MeV$ [16].

Existen tres componentes de la RCS: la componente electromagnética, compuesta principalmente por electrones y positrones ($e^\pm$) y algunos rayos gamma (γ); la componente muónica, compuesta por muones ($\mu^\pm$) y neutrinos (ν); y la componente nucleónica, compuesta principalmente por protones y neutrones. Si la energía cedida a la componente nucleónica es suficientemente grande, las partículas resultantes pueden seguir interaccionando con los átomos de la atmósfera, formando chubascos atmosféricos [11] como el de la Figura 1.4.

El flujo de partículas debido a la RCS se ve afectado por la cantidad de masa atravesada, por la humedad, la temperatura, etc. [10]. Al cambiar la densidad del aire, puede provocar que más partículas sean absorbidas por la atmósfera antes de llegar a los detectores de la superficie, por lo que para los detectores hay una corrección por presión, también puede haber corrección por temperatura y humedad, pero en este trabajo no se consideran estas correcciones.

Con el estudio de los rayos cósmicos se llegó a determinar un ciclo de actividad solar de 11 años, en el que durante su máxima actividad presenta un mayor número de manchas solares, de erupciones y de eventos de partículas que pueden llegar a afectar la Tierra. Estos eventos pueden llegar a causar afectaciones en y alrededor de nuestro planeta. Algunos de los efectos de la actividad solar es el que pueden causar tormentas geomagnéticas, las cuales son la causa de eventos como la *Aurora borealis* y la *Aurora australis*. También pueden llegar a causar serias afectaciones a los sistemas de navegación por satélite (GNSS), a la inducción de corrientes eléctricas en líneas de transmisión, interferencias en sistemas de telecomunicaciones, entre otros. Otro evento solar es la emisión de partículas energéticas solares (SEP), las cuales contienen una gran cantidad de radiación, con una dosis mucho mayor que la que normalmente se recibe en la superficie terrestre. Estos eventos son una seria

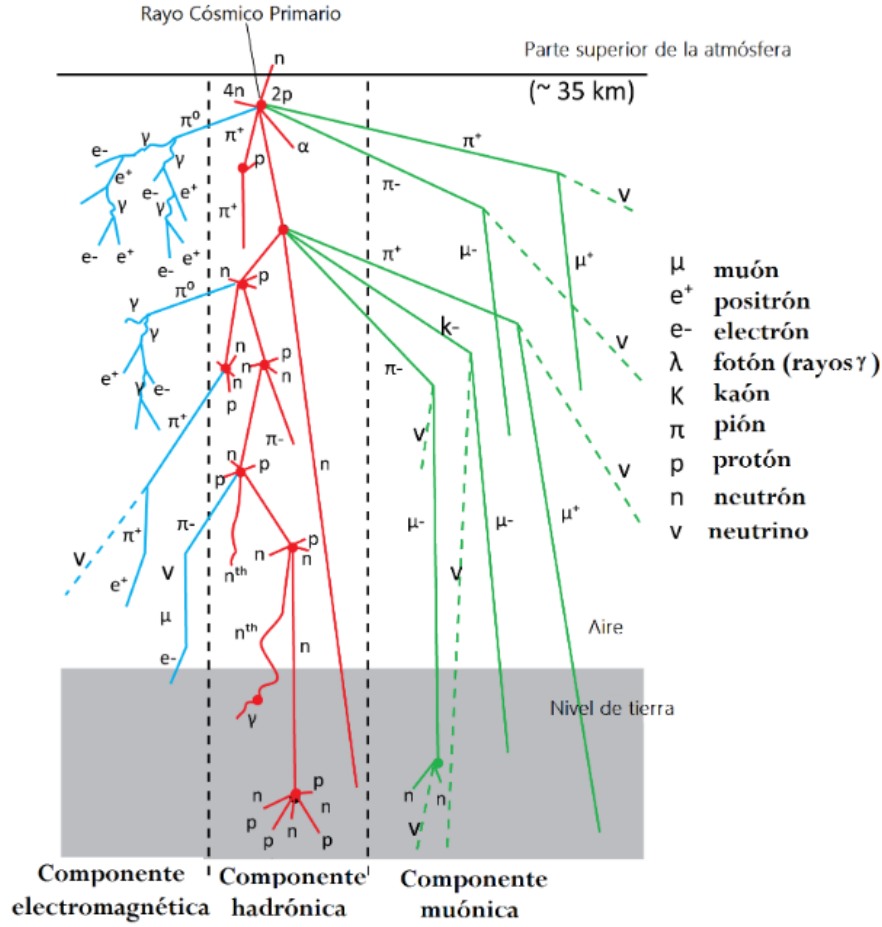


Figura 1.4: Chubasco atmosférico generado por rayo cósmico primario [12]

preocupación para astronautas que puedan llegar a estar fuera de la protección de la magnetósfera terrestre, o en latitudes en la que la protección sea mínima, como en vuelos cerca de los polos magnéticos.

Las emisiones y actividad solar se estudia y analiza con el registro continuo del flujo de RC a nivel de tierra. De este modo, el Monitor de Neutrones de la Ciudad de México (**MN-CDMX**) mide el flujo de RC para el Servicio de Clima Espacial - México (**SCIESMEX**). El estudio, la emisión de alertas, pronósticos y reporte de estos eventos en México, los lleva a cabo el **SCIESMEX**. El monitor de **MN-CDMX** junto con otro tipo de instrumentos pertenecen al Laboratorio Nacional de Clima Espacial (**LANCE**) que lleva a cabo la investigación y análisis de datos y eventos de Clima Espacial en México y trabaja en conjunto con el **SCIESMEX**. De este modo, es imperante que el **MN-CDMX** mantenga un registro continuo y científicamente estable del flujo de RC.

El monitor de neutrones

Uno de los primeros instrumentos creados para la detección de radiación fueron los detectores de ionización, que recolectan iones y electrones producto de la ionización de un gas por el que pasa radiación. Existen tres tipos básicos de detectores de ionización que se han utilizado casi desde el origen del estudio de RC; la *cámara de ionización*, el *contador proporcional* y el *contador Geiger-Müller*.

Una de las configuraciones más usadas, como la mostrada en la Figura 2.1, consiste en un contenedor cilíndrico con paredes conductoras (cátodo), una terminación aislada de las paredes en una de las bases, de la cual se suspende un alambre conductor (ánodo) a lo largo del eje, al cual se le aplica un voltaje positivo relativo a las paredes del contenedor, el contenedor esta relleno con un gas apropiado.

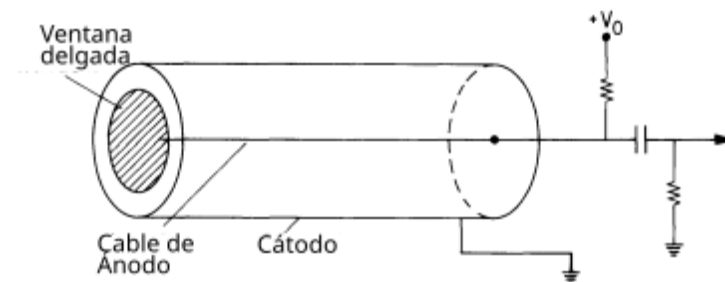


Figura 2.1: Detector de ionización básico [14].

La radiación que pasa por el detector interacciona con el gas formando pares ion-electrón, el promedio de pares formados es proporcional a la energía depositada en el detector. Si al detector no se le aplica una diferencia de potencial los pares se recombinan; por el contrario, si una diferencia de potencial es aplicado, la intensidad del campo eléctrico puede ser suficiente para evitar la recombinación y se forma una corriente eléctrica al recolectar los pares.

En realidad, los tres instrumentos mencionados anteriormente son un mismo tipo de dispositivo operado en distintas configuraciones, aprovechando propiedades

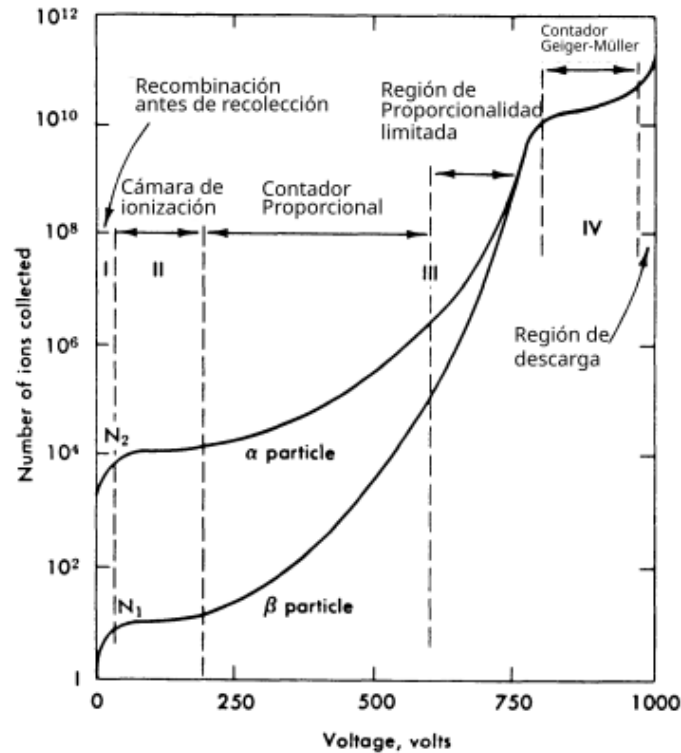


Figura 2.2: Modo de operación de detector de ionización dependiendo del voltaje aplicado [14].

físicas diferentes. En la Figura 2.2 se observan las diferentes regiones en las que puede trabajar un detector de ionización. La primera región, en la cual no hay un campo eléctrico (o por lo menos no lo suficientemente intenso) dentro del cilindro, se le conoce como *región de recombinación*. Al ir aumentando el voltaje, se forma un campo eléctrico que sirve para separar a los iones y electrones, los cuales son capturados por los electrodos y se induce un pulso de corriente. El incrementar el voltaje aplicado no aumenta la corriente medida, ya que los pares creados son recolectados eficientemente por los electrodos y se llega a una corriente de saturación. A esta región plana se le conoce como *cámara de ionización*, la corriente en esta región es muy baja y su valor es proporcional a la energía depositada por la radiación incidente[14][1].

Al seguir aumentando el voltaje aplicado, el campo eléctrico dentro del cilindro se vuelve tan intenso que las cargas liberadas por la interacción de la radiación son aceleradas hasta el punto que estas pueden producir una ionización secundaria. Esta ionización secundaria produce una avalancha o cascada de ionización que se forma de forma rápida y muy cerca del ánodo (Figura 2.3, ya que el campo eléctrico es más intenso en su cercanía). El número de pares ion-electrón formados en la avalancha es directamente proporcional a el número de electrones primarios. El resultado es una amplificación proporcional de la corriente, cuyo factor depende del voltaje aplicado, pero puede llegar a ser de hasta 10^6 [14]. A esta región se le conoce como *región proporcional*.

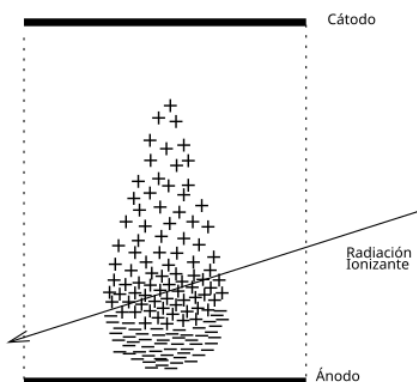


Figura 2.3: Avalancha típica en un detector de ionización [1].

Si se continua aumentando el voltaje, la creación de pares es tan abundante que la cantidad de iones positivos empieza a afectar el campo eléctrico efectivo que ven las cargas cerca del ánodo y la proporcionalidad del número de cargas creadas empieza a perderse. A esta región se le conoce como región de *proporcionalidad limitada*. Debido a que su respuesta no es lineal, no hay detectores que operen en esta región.

La última región de operación se llega aumentando aún más el voltaje, de forma que se forman avalanchas muy grandes en el gas, produciendo una gran cantidad de pares. El pulso de corriente que se forma se satura y tiene siempre la misma amplitud, sin importar la energía de la partícula incidente. El tamaño del pulso es fácilmente medible por la electrónica asociada a este tipo de detector, por lo que son usados ampliamente en aplicaciones de dosimetría, a esta región se le conoce como región *Geiger-Müller*, este tipo de detectores son conocidos como contadores Geiger.

Si estando en la región Geiger-Müller sigue aumentandose aún más el voltaje, se llega a la región de *descarga continua*. Esta región debe evitarse ya que se ha alcanzado el voltaje de ruptura del gas y puede llevar a descargas entre los electrodos que pueden dañar el detector.

2.1. Contadores proporcionales

El MN-CDMX está configurado como contador proporcional. Como un contador proporcional puede ser utilizado para detectar diferentes tipos de radiación, el tipo de gas que se usa dentro del detector es importante ya que aprovecha diferentes características para promover el tipo de interacción nuclear que se desea. Se han utilizado contadores proporcionales para la detección de neutrones desde la década de 1920, fueron mejorados durante el Proyecto Manhattan y se han utilizado en redes de detección mundial desde mediados del siglo XX [19].

Los contadores proporcionales para detección de neutrones utilizan BF_3 o 3He , estos gases se utilizan ya que los neutrones tienen mayor probabilidad de interactuar con sus moléculas y pueden ser operados con voltajes altos sin llegar a la región Geiger-Müller con lo que se obtiene un buen factor de amplificación.

Dentro del contador proporcional se produce una reacción química entre el neutrón incidente y los átomos de boro:



La partícula α interactúa con las moléculas del gas y produce los pares electrón-ion. Como se mencionó anteriormente, debido a la polarización se inicia la avalancha de ionización y sigue el proceso descrito anteriormente.

2.1.1. Características del detector NM64

Existen dos principales tipos de detectores de neutrones utilizados para detección de RC. El primero diseñado entre 1948 y 1951 por John A. Simpson de la Universidad de Chicago, quien lo utilizó para medir la variación de la intensidad de los rayos cósmicos, sirvió para demostrar que existe una modulación interplanetaria solar de rayos cósmicos galácticos y aportó evidencia para demostrar que la heliosfera es dinámica. Este detector fue estandarizado en 1957 durante el año Internacional de la Geofísica (International Geophysical Year)[16] e instalado en más de 60 sitios alrededor del mundo incluido México.

Durante el congreso International Quiet Sun Year (IQSY) en 1964 se estandarizó un nuevo monitor de neutrones diseñado por Hugh Carmichael denominado Super Monitor de Neutrones NM64, la diferencia entre los detectores NM64 y el IGY además del tamaño, es que este último puede producir una tasa de conteo de hasta 25000 cuentas por hora y el NM64 hasta 750000 [10]. La denominación completa de los detectores NM64 dependen del número de contadores que utilicen, en el caso del de la Ciudad de México su denominación es 6-NM64.

El NM64 se compone con las siguientes partes:

- *Reflector*: es una estructura hecha de polietileno que encierra a las demás partes, sirve para moderar y reflejar los neutrones creados en el interior por el productor. También sirve para aislar y absorber neutrones de baja energía producidos en el entorno exterior del monitor para que no afecten significativamente el funcionamiento del monitor. Cubre un volumen de $3,15m \times 2,2m \times 0,55m$ formado por varios bloques con $7,5cm$ de grosor.
- *Productor*: son anillos de plomo dentro de los cuales se encuentran el moderador y el contador proporcional. Generan neutrones de evaporación de baja energía. La probabilidad de detección de estos neutrones de evaporación es de $\sim 6\%$.
- *Moderador*: es un tubo de polietileno que rodea al tubo contador. Desacelera a los neutrones mediante colisiones a energías termales ($\sim 0,025eV$).
- *Contador proporcional*: son tubos llenos con trifloruro de boro (BF_3) enriquecido al 96% con ^{10}B

2.2. El monitor de neutrones de la Ciudad de México

El monitor de neutrones de la Ciudad de México (MN-CDMX), forma parte del Observatorio de Rayos Cósmicos "*Javier A. Otaola Lizarzaburu*", pertenece al Instituto de Geofísica y se encuentra dentro de la Facultad de Veterinaria. El edificio que lo alberga fue construido antes que la facultad y desde los años 70 se encuentra dentro de este edificio. Durante la década de los 80s, el Dr. Javier Otaola Lizarzaburu llevó a cabo un estudio estadístico de los datos registrados y determinó que los datos obtenidos eran incorrectos, lo que lo llevo a revisar la construcción del monitor y encargó al Ingeniero Octavio Musalem y el Físico Alejandro Hurtado la tarea de diseñar un nuevo sistema de adquisición de datos. Este sistema tuvo sus primeras pruebas exitosas en el año de 1989 y operó de manera continua desde 1990 hasta el año 2020.

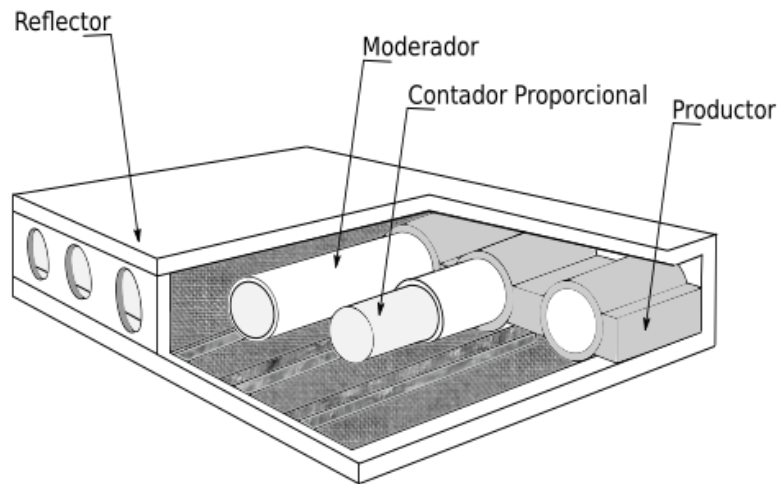


Figura 2.4: Estructura detector 6-NM64 [11]



Figura 2.5: Carátula del viejo sistema de adquisición

En un principio, el almacenamiento de datos se hizo mediante cintas magnéticas que como máximo tenían la capacidad de guardar tres días de datos. Por la misma restricción de almacenamiento, en un principio se tomaban mediciones de los conteos de neutrones cada 5 minutos y los datos estaban escalados, es decir, las cuentas obtenidas había que multiplicarlas por 10.

Cuando pudieron guardar archivos en una computadora, era necesario utilizar diskettes para que no se saturara el disco duro de la computadora. En 2008, gracias al Ingeniero Daniel Rodríguez, se creó una base de datos en PostgreSQL y se creó un sitio web en donde se muestran los datos del MN-CMDX. Ésta página sigue en línea en www.cosmicrays.unam.mx. El monitor también pertenece a una red mundial de monitores de neutrones y se suben diariamente los datos, donde pueden compararse con los de otros monitores en www.nmdb.eu/nest.

El sistema diseñado por el Ingeniero Octavio Musalem y el Físico Alejandro Hurtado estaba basado en lógica TTL discreta, por lo que utilizaba una gran cantidad de circuitos integrados y cuando llegaba a fallar algún módulo, la localización podía llegar a ser muy complicada. Las tarjetas de circuito impreso (PCB) que se diseñaron en ese tiempo fueron hechas sin la ayuda de herramientas de diseño electrónico, por lo que el diseño fue arduo y llevó mucho tiempo. Uno de los problemas que enfrentó este diseño fue que tenía que sincronizarse manualmente y, aunque una diferencia temporal de unos cuantos segundos en la adquisición es tolerable [6], siempre se requería atención a este detalle.

3.1. Breve historia de la fabricación de circuitos impresos

El uso de tarjetas de circuito impreso *PCB* (placa aislante con pistas conductoras que reemplazan el cableado) surgió por la necesidad de interconectar componentes eléctricos con electrónicos de forma confiable. John Baynes en 1888, usó técnicas de exposición y grabado en metales que tuvieron gran similitud a las técnicas empleadas para el grabado de PCBs.

En 1903, Albert Hanson intentó patentar un dispositivo que consistía en conductores de lámina plana sobre una placa aislante que incluía perforaciones para conectar conductores de ambos lados. En 1927, Charles Ducas patentó un aparato que servía para imprimir «cables» con tinta conductora en una superficie aislada.

Fue hasta 1936, que Paul Eisler fabricó una radio con la primer PCB moderna (figura 3.1). El interés en su invento se dio hasta la Segunda Guerra Mundial, debido a que su técnica daba reproducibilidad a bajo costo. Después de la guerra, la mayoría de la electrónica de consumo seguía usando las conexiones punto a punto. En 1956, el ejército de EUA liberó la patente para el "procesamiento de armado de circuitos eléctricos", iniciando una explosión en el uso de PCBs en el ámbito comercial.

En los años 60s, se refinaron las técnicas de fabricación, lo que permitió apilar capas y conectarlas mediante *vias* (agujeros chapados). La fabricación de PCBs multicapa, permitió una mayor densidad de componentes en espacios más reducidos. La reducción de las tolerancias, junto con el desarrollo de dispositivos con tecnología de montaje superficial



Figura 3.1: Paul Eisler con la primer radio con PCB (foto: Maurice Hubert, Multitech UK)[13]

(SMT), llevó a la industria hacia la miniaturización y automatización.

Durante las décadas de los 80s y 90s, con tarjetas cada vez más pequeñas, los fabricantes desarrollaron mejores herramientas de automatización e inspección, obteniendo procesos de alto rendimiento, reduciendo el tiempo de comercialización de los productos. En esta época crece el uso de software de diseño asistido por computadora (CAD), el uso de circuitos integrados (IC) con un gran número de pines y se crean técnicas de interconexión de alta densidad (HDI), las cuáles se apoyan en la perforación mediante laser y uso de materiales avanzados, que sirvieron para reducir aún más el tamaño de las PCBs, manteniendo la funcionalidad sin comprometer las necesidades de energía y disipación térmica.

En los primeros años después del 2000, las restricciones sobre el uso de sustancias peligrosas (RoHS) obligó a la industria global de fabricación de PCBs a modificar sus procesos y re-evaluar los materiales utilizados. Actualmente, las técnicas de fabricación permiten la creación de PCBs rígidas, flexibles, rígido-flexibles e incluso electrónica impresa, usada en sensores, medicina, dispositivos vestibles (wearable) y para el Internet de las Cosas (IoT).

3.2. Pasos en el diseño de PCBs

El proceso de diseño de PCBs puede describirse a grandes rasgos de la siguiente forma:

- *información de los componentes*: identificación de pines y de ser necesario crear su símbolo esquemático;
- *dibujo de esquemático*: posicionamiento de todos los símbolos y conexión de redes y buses;
- *dibujo de tarjeta*: se delimitan las dimensiones que tendrá la PCB, posicionamiento temporal de componentes y su etiquetado;
- *enrutamiento de pistas*: posicionamiento final de componentes de acuerdo a las conexiones (floorplan). De ser posible todos los componentes que tengan conexiones entre si, deben colocarse en el mismo vecindario. Puede usarse el enrutador automático del CAD.
- *verificación y edición de PCB*: se revisa el diseño (layout) para identificar posibles errores, se hace una verificación de las reglas de diseño (DRC), y otra verificación de conectividad final.
- *creación de datos para fabricación*: se crean los archivos necesarios para que el fabricante de PCBs pueda construir la tarjeta.

Tomando en cuenta los pasos mencionados anteriormente, podemos dividir el proceso en dos etapas: la elaboración del diagrama esquemático, y el layout de la PCB. Mediante esta subdivisión se evitan modificaciones tardías que comprometan el plan original; sin embargo, siempre es preferible un ciclo de rediseño a una PCB inservible.

3.2.1. Diagrama esquemático

Toda PCB que cumple con su función, comienza con un buen diagrama esquemático. Esto sirve para que el software identifique las conexiones de cada pin y facilita identificar componentes cuando se tenga la PCB física. En notas de aplicación, libros, blogs de software EDA (Electronic Design Automation), así como en foros especializados de internet, una de las principales recomendaciones es tener un esquemático detallado, es decir:

- Ser lo más claro posible en la conexión de los pines. Se puede utilizar etiquetas en redes para no dibujar toda la línea de pin a pin (especialmente útil cuando se tienen muchas conexiones en un solo documento).
- Si el programa lo permite y la complejidad o densidad de conexiones del circuito a diseñar lo hace necesario, se puede hacer un diseño en varias hojas, pudiendo poner en una sola hoja subcircuitos que tengan funciones específicas.
- Cuando un subcircuito se repite múltiples veces, se puede reutilizar cuantas veces sea necesario.
- Es recomendable anotar cualquier necesidad especial de algún componente, alguna aclaración sobre el diagrama, o anotar las conexiones de los pines (vease figura 3.2).
- Si nuestro circuito contiene señales analógicas y digitales, es necesario diferenciar en el diagrama si es una tierra analógica o digital.

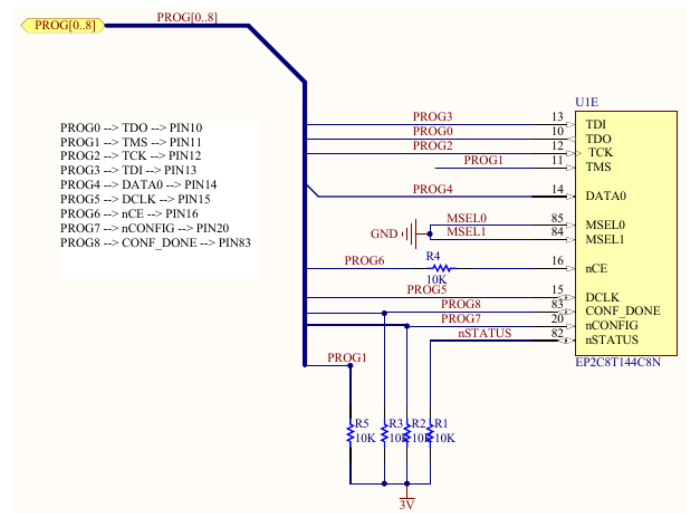


Figura 3.2: Anotaciones en esquemático de pines de configuración del FPGA

En este trabajo se contribuye al desarrollo del nuevo sistema de adquisición de datos (**NDAQ**), diseñado originalmente por Rocío García y Marcos Anzorena [10]. El NDAQ se diseñó con el objetivo de sustituir al anterior sistema (**VDAQ**) del MN-CDMX, continuando con la funcionalidad pero mejorando el mantenimiento y la modularidad.

En la Figura 3.3 se muestran los componentes que forman al MN-CDMX. El hardware del NDAQ realiza dos funciones claras, la amplificación de los pulsos del detector (tubo proporcional y preamplificador) y el conteo de eventos. Se implementó una PCB independiente para cada función, de forma que el reemplazo y reparación sea más fácil ante fallos. El software de adquisición se desarrolló en Python bajo plataforma Linux.

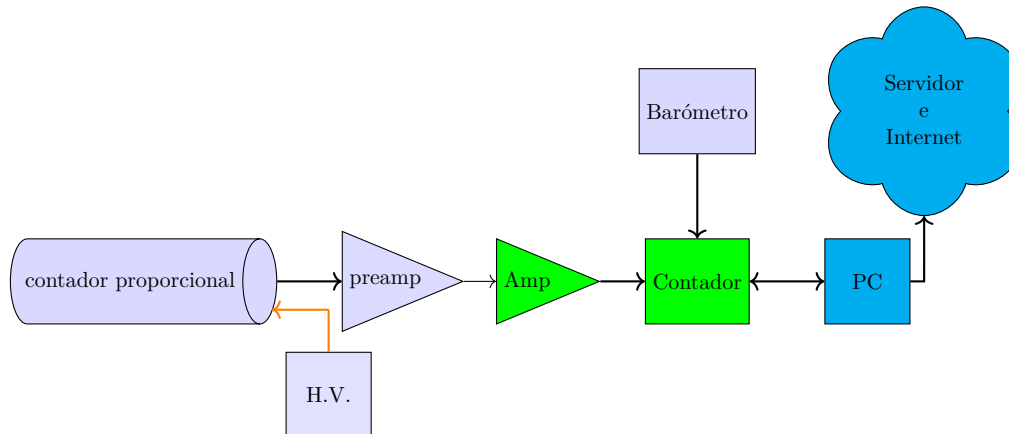


Figura 3.3: Diagrama del MN-CDMX

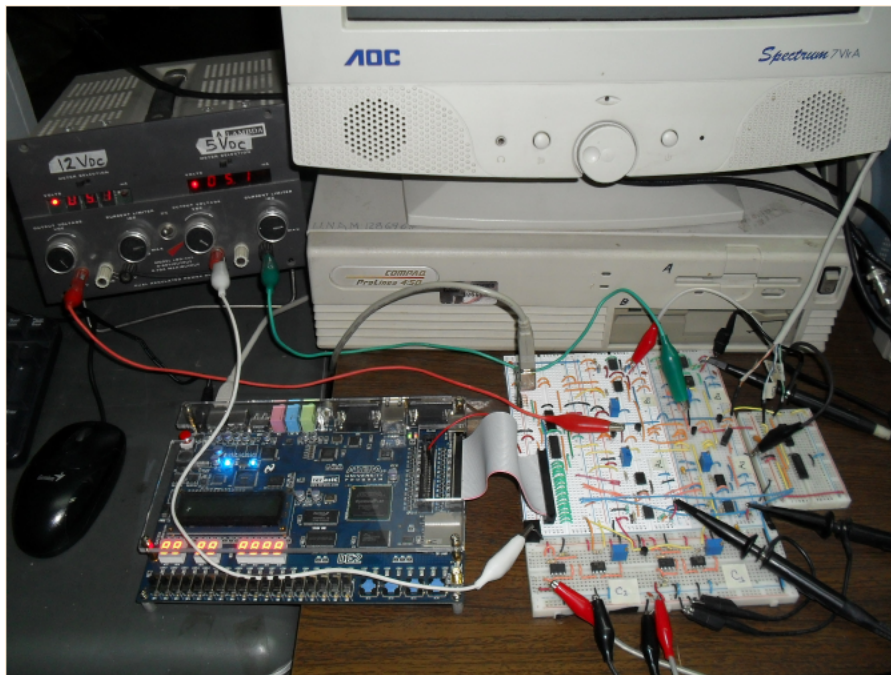


Figura 3.4: Circuito de prueba de NDAQ [10]

La Figura 3.4 muestra el diseño original de [10], cuyo funcionamiento demostró que podía sustituir al VDAQ con algunas ventajas:

- Software Moderno. Fácil de mantener y portar a una plataforma más nueva,

- Conexión entre hardware y software mediante interfaz USB,
- Reducción significativa de componentes al utilizar un dispositivo lógico programable (PLD).

En el presente trabajo, una de las primeras actividades completadas fue el diseño y armado de una PCB con el FPGA elegido, EP2C8T144C8N de la familia Cyclone II (figura 3.5). En esta PCB, se probó el uso de una memoria de configuración no volátil de la familia EPCS (EPCS16518N), esto con el fin de evitar la reconfiguración manual tras cada ciclo de reinicio. Esta PCB fue construida en el entonces CCADET. El FPGA se soldó utilizando una estación de soldadura del *Laboratorio de Electrónica Digital* en la Facultad de Ingeniería. El diseño de esta tarjeta permitió determinar los pines de alimentación, pines de configuración y entradas de reloj del FPGA a usarse en la PCB final.

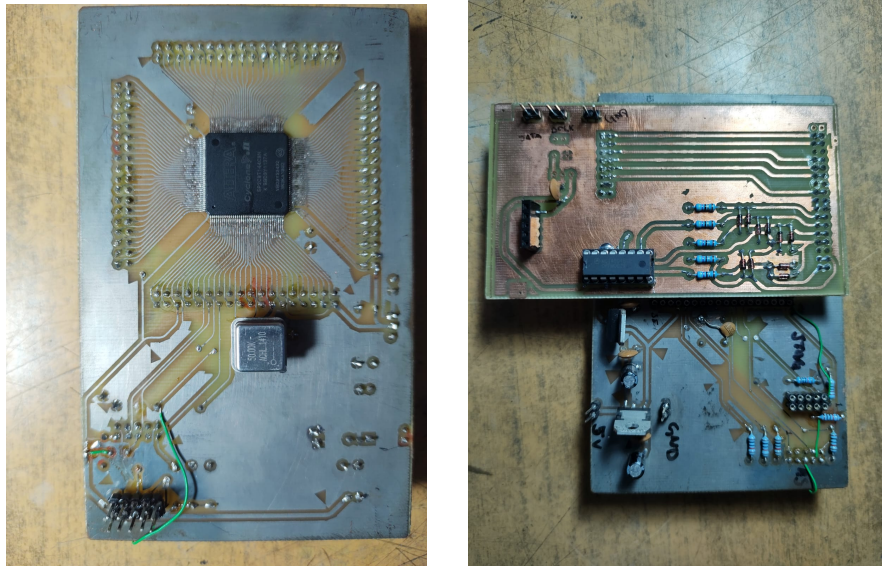
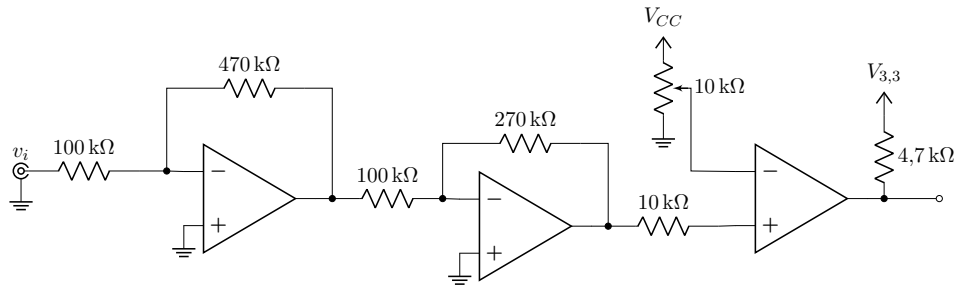


Figura 3.5: Prototipo de PCB NDAQ

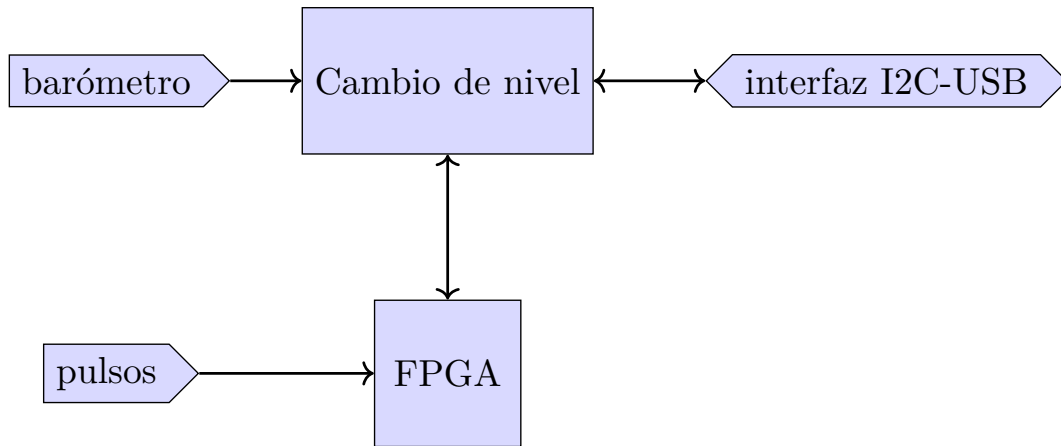
3.3. Diseño de PCBs del NDAQ

El módulo de amplificación contiene el circuito de la Figura 3.6a, el cual consiste de dos etapas de amplificación con una ganancia total que puede seleccionarse entre $A_v \simeq [8, 9, 13, 15]$ mediante jumpers, seguido por un discriminador y cambiador de nivel a 3,3 V para que el FPGA pueda hacer el conteo de los pulsos.

Para el módulo contador se muestra el diagrama que lo compone en la Figura 3.6b. El NDAQ utiliza un chasis de estándar CAMAC (Computer Automated Measurement and Control) que se encontraba sin uso en el Observatorio de Rayos Cósmicos de la Ciudad de México (ORC-CDMX). Aunque el protocolo CAMAC no es utilizado, se aprovecha su estructura modular y conexiones de alimentación y señal. Gracias a este chasis, los pulsos de neutrones llegan al módulo contador mediante un backplane, mientras que la información del barómetro llega al frente por un conector de audio, las instrucciones de control del FPGA se reciben por una



(a) Circuito del módulo de amplificación.



(b) Diagrama del módulo contador

Figura 3.6: Diagramas del Hardware del NDAQ

interfaz I2C-USB desde la computadora. Tanto los datos del barómetro, como las instrucciones de la PC deben pasar por un cambio de nivel de voltaje, el cual lo hace el circuito integrado MC14504BCP.

Al pasar de un prototipo en protoboard a una PCB es importante tener en cuenta varios aspectos del producto final:

- **Tamaño y montaje de la PCB:** este punto da una idea general de cómo posicionar los CIs y poder definir zonas prohibidas (keep-out) para los componentes, y determinar posibles orificios para tornillos en caso de ser necesarios.
- **Componentes a utilizar:** es importante saber si la PCB va a tener señales analógicas, digitales o ambas para poder evitar interferencia electromagnética, o introducción de ruido excesivo.
- **Tipo de tecnología a utilizar:** dependiente de los puntos anteriores, el tamaño, densidad de componentes o señales, pueden restringir el tipo de dispositivos a utilizar (THT o SMT).
- **Número de capas de la PCB:** en diseños con una gran densidad de componentes o señales, es necesario evaluar si la PCB requiere una, dos o más capas para

facilitar el trazado de pistas o el uso de planos sólidos de referencia. Una restricción extra es el presupuesto que se tiene para la fabricación.

- Identificación de pines importantes: como lo son osciladores, líneas de alimentación, señales diferenciales, de alta frecuencia o de conmutación rápida.
- Tolerancia a la velocidad del circuito: determinar si el funcionamiento del circuito requiere consideraciones estrictas de integridad de señal (alta velocidad) o si es más tolerante.

Con respecto a este último punto, en un circuito de baja frecuencia no son necesarias restricciones estrictas sobre los componentes pasivos, cables, trazas de la PCB y empaques de CIs. En el diseño digital de alta velocidad, estos elementos llegan a afectar la propagación de la señal generando oscilaciones (*ringing*), reflexiones, interacción entre señales (*crosstalk*) e interacciones con el medio ambiente (interferencia electromagnética [20]).

Se dice que todo diseño de PCB es de alta velocidad, ya que una transición rápida, combinada con una longitud de traza suficientemente grande ($\lambda/6$ o $\lambda/4$ en donde λ es la longitud de onda de la señal), puede generar reflexiones y perjudicar la integridad de la señal [20]. Así mismo, si la frecuencia de las señales es muy alta, tiene que considerarse el uso de líneas de transmisión. En el NDAQ, la señal más rápida es la del reloj que alimenta al FPGA con una frecuencia de 50 MHz, para el cual se leyeron las recomendaciones de su fabricante y se ha colocado lo más cerca del pin de reloj del FPGA.

Tamaño y montaje de la PCB

Como se mencionó anteriormente, el NDAQ utiliza un chasis CAMAC, la forma de la tarjeta es rectangular con un conector tipo peine (Card Edge Conector) que sobresale y se conecta al "*backplane*" del chasis. Las dimensiones son de 304.5 mm en su lado más largo, 182.6 mm al frente de la PCB y el conector del borde mide 111.6 mm por 20 mm de profundidad (figura 3.7).

Componentes y tecnología a utilizar en el NDAQ

Para el módulo amplificador, se emplean dispositivos de tecnología *through hole* (THT), facilitando la sustitución manual de componentes ante posibles fallas. En el módulo contador, debido a la densidad de pines del FPGA y de sus capacitores de desacoplamiento se empleó tecnología de montaje superficial (SMT), con algunos dispositivos THT. Los componentes de cada módulo se indican en las Tablas 3.1 y 3.2:

La decisión de usar dispositivos de montaje superficial en el módulo contador buscó privilegiar un plano de tierra continuo para optimizar los retornos de corriente. Aunque algunas pistas debieron cambiar de capa, se minimizó dicha transición para evitar discontinuidades de impedancia y afectar la integridad de la señal.

Capas a utilizar en la PCB

Debido a que las señales del NDAQ no operan a alta frecuencia y principalmente son seis canales de conteo de neutrones, el espacio disponible en las dimensiones de

Tabla 3.1: Componentes módulo contador.

Designación	Componente	Valor	Cantidad	Tecnología
U1	EP2C8T144C8N	-	1	SMT
U2	EPCS16518N	-	1	SMT
U3	MC14504BCP	-	1	THT
U4,U5	SN74ACT14D	-	2	SMT
U6	LF33CV	-	1	THT
U7	LM317	-	1	THT
D1 -D5	LM317	-	5	THT
D10	LED	-	1	THT
R1-R5,R13	-	10k Ω	6	SMT
R6-R10	-	47 Ω	5	SMT
R12	-	1k Ω	1	SMT
R1-R5	-	10k Ω	1	SMT
R14	-	470 Ω	1	THT
C1-C6	-	0,1 μF	6	SMT
C_{OSC}	-	0,01 μF	1	SMT
C8,C10,C13	-	0,1 μF	3	SMT
C9,C11,C12	-	2 μF	3	SMT
C5,C16	-	1 μF	2	SMT
HEADER	1X2	-	4	THT
HEADER	8X2	-	3	THT
HEADER	14X2	-	1	THT

Tabla 3.2: Componentes módulo amplificación (1 canal)

Designación	Componente	Valor	Cantidad	Tecnología
U1	MC33178P	-	1	THT
U2	LM311	-	1	THT
REG1	MC7806ACT	-	1	THT
REG2	MC7906ACT	-	1	THT
REG3	LF33CV	-	1	THT
CV1,CV2	-	0,1 μF	2	THT
CD1-CD4	-	0,1 μF	4	THT
C1	-	0,33 μF	1	THT
C2,C5	-	0,1 μF	2	THT
C3,C6	-	2,2 μF	2	THT
C4	-	1 μF	1	THT
R1,R3	-	100k Ω	2	THT
R2	-	1M Ω	1	THT
R4	-	390k Ω	1	THT
R5	-	10k Ω	1	THT
R6	-	4,7k Ω	1	THT
R7	Potenciómetro	10k Ω	1	THT
R8	-	470k Ω	1	THT
R9	-	270k Ω	1	THT
-	Conector BNC	-	1	-

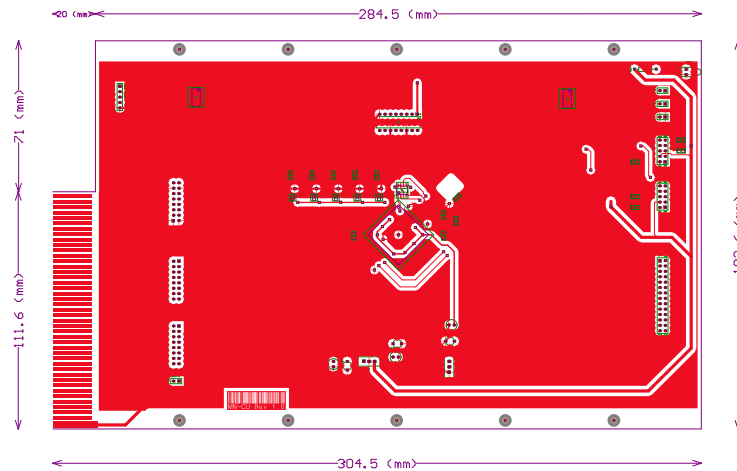


Figura 3.7: Dimensiones de PCB.

la tarjeta es suficiente para la densidad de componentes del NDAQ.

Aunque el uso de múltiples capas suele recomendarse para inmunidad al ruido, el NDAQ solo tiene una señal de 50 MHz, la cual tiene una longitud de pista de menos de 20 mm. El resto de señales trabaja en el rango de kHz, por lo que una PCB de 2 capas es suficiente.

Identificación de pines y posicionamiento de componentes

En cualquier diseño de PCB es vital priorizar señales sensibles (reloj, líneas de alimentación, alta velocidad). En el NDAQ, la señal del oscilador representó la máxima prioridad del enrutamiento, seguida por las líneas de comunicación con la interfaz I2C y líneas de datos del barómetro.

Gracias a la flexibilidad de asignación de pines del FPGA, se seleccionaron los bancos de E/S más convenientes a la posición de los conectores de entrada, minimizando el cambio de dirección en el enrutamiento de las pistas.

Los componentes se agruparon por bloques funcionales afines, manteniendo las rutas de señal lo más cortas posibles y evitando cambios entre capas.

3.3.1. Recomendaciones generales aplicadas en el diseño

En la elaboración de las PCBs se siguieron reglas generales de buenas prácticas:

- Usar el mayor ancho de pista posible y tener una separación entre pistas de por lo menos un 50 % adicional del ancho de la pista.
- Cuando sea posible mantener un plano de tierra bajo las pistas.
- En las trazas con señal tratar de mantener al mínimo su longitud. Preferentemente mucho menor a $(\lambda/4)$.
- Evitar trazar pistas a menos de 1mm de la orilla de la PCB para prevenir problemas por humedad.

- Tratar de mantener un balance en la cantidad de cobre para prevenir deformaciones mecánicas.

3.3.2. Placas de circuito impreso

Las figuras 3.8 a 3.14 muestran los diseños de las PCBs, generadas en el software CAD y una fotografía del hardware en funcionamiento.

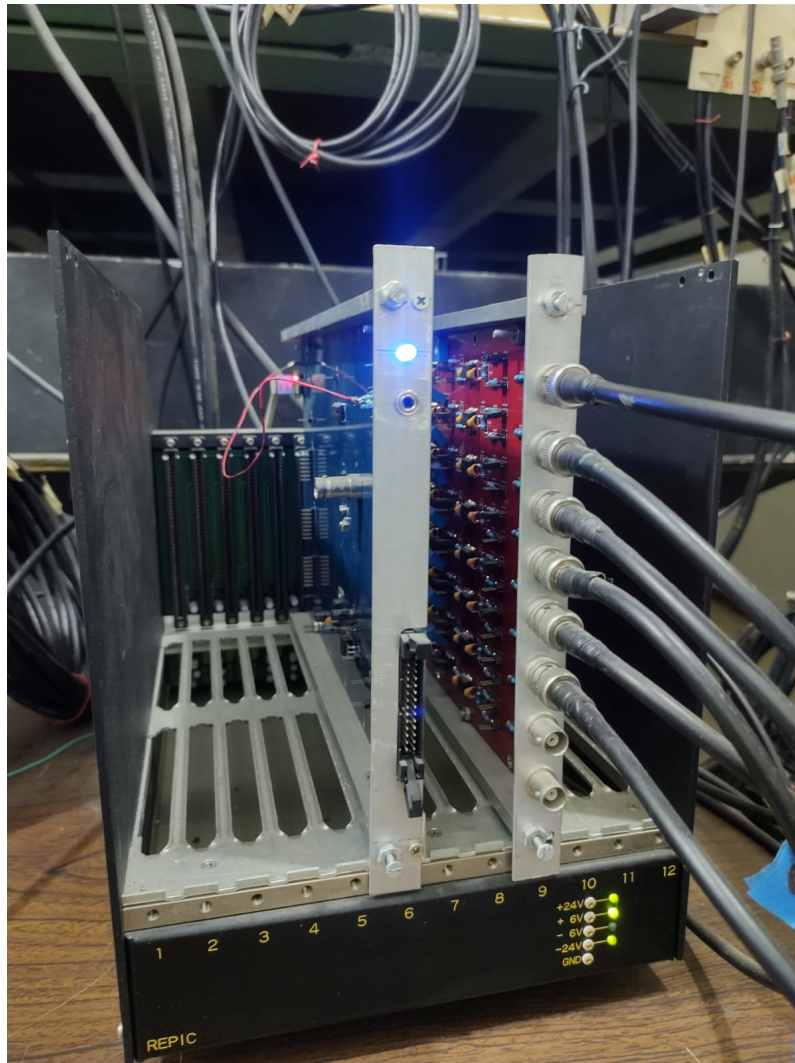


Figura 3.8: Módulos de NDAQ funcionando.

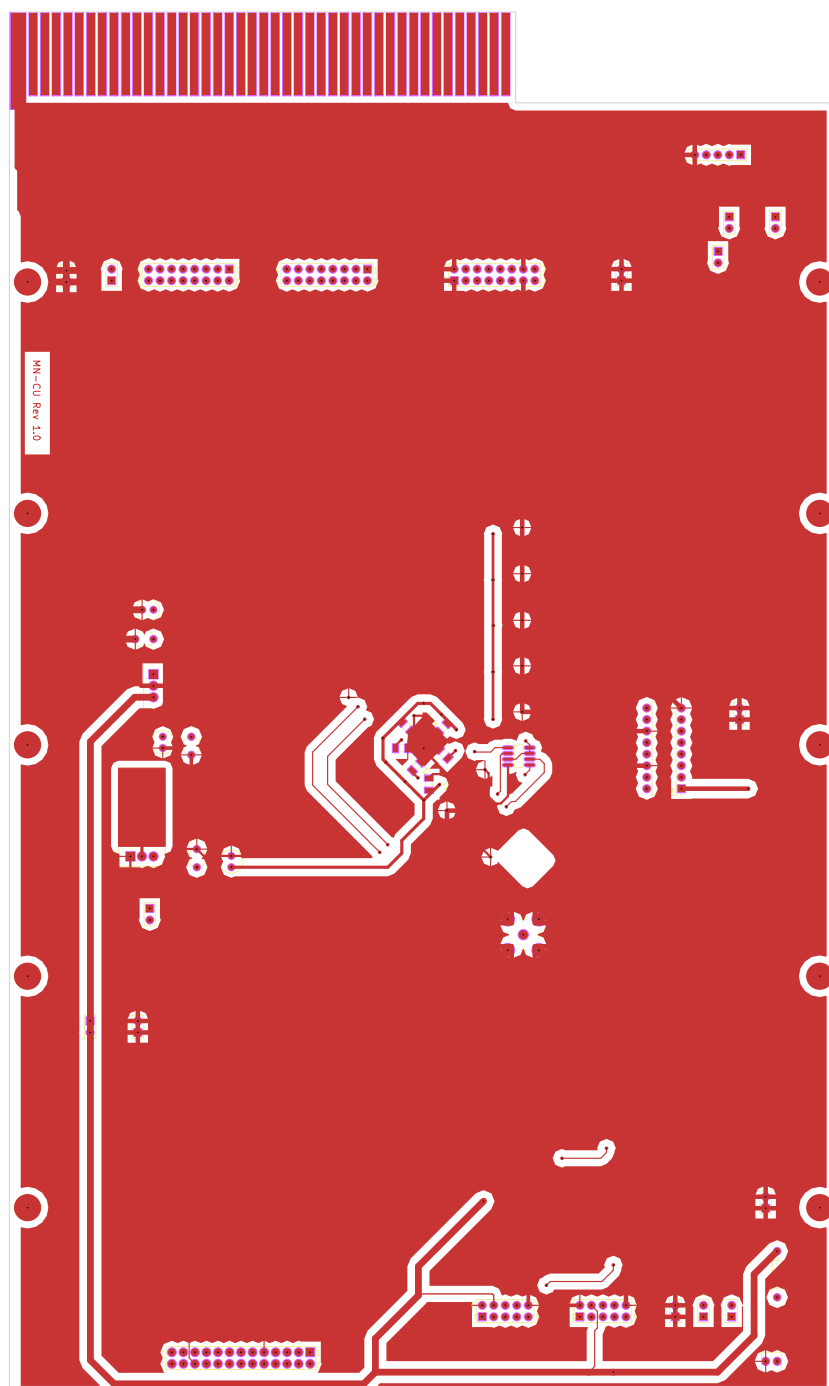


Figura 3.9: Capa superior de módulo contador.

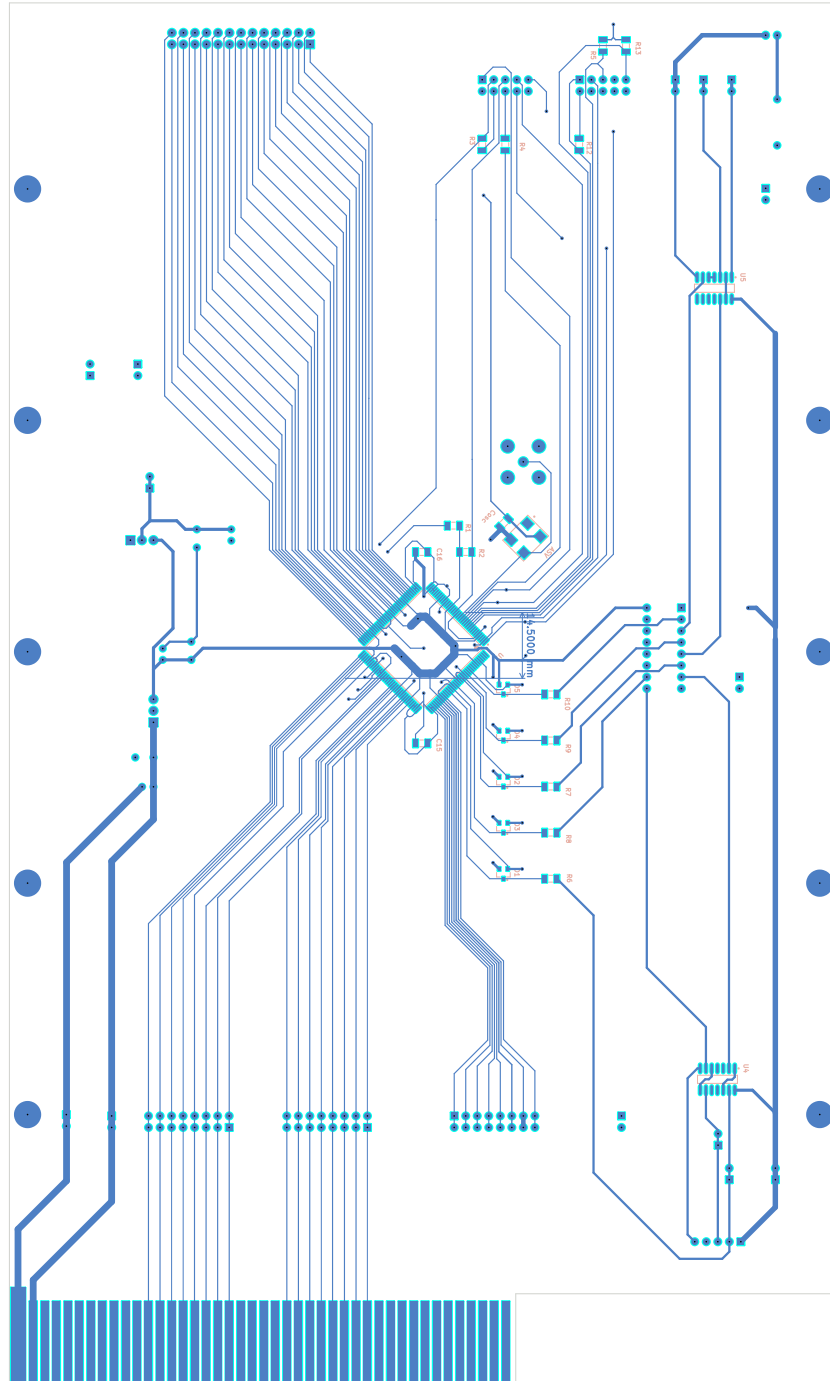


Figura 3.10: Capa inferior de módulo contador.

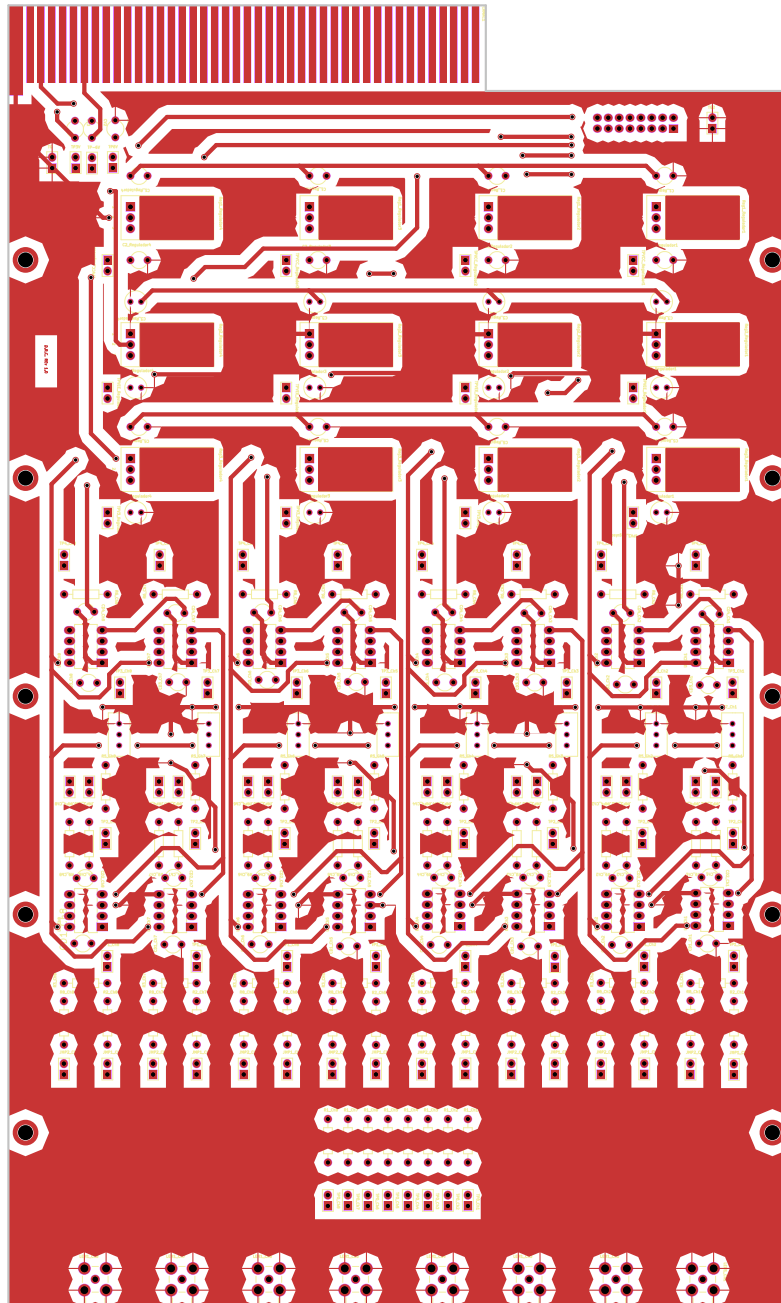


Figura 3.11: Capa superiores de módulo amplificador.

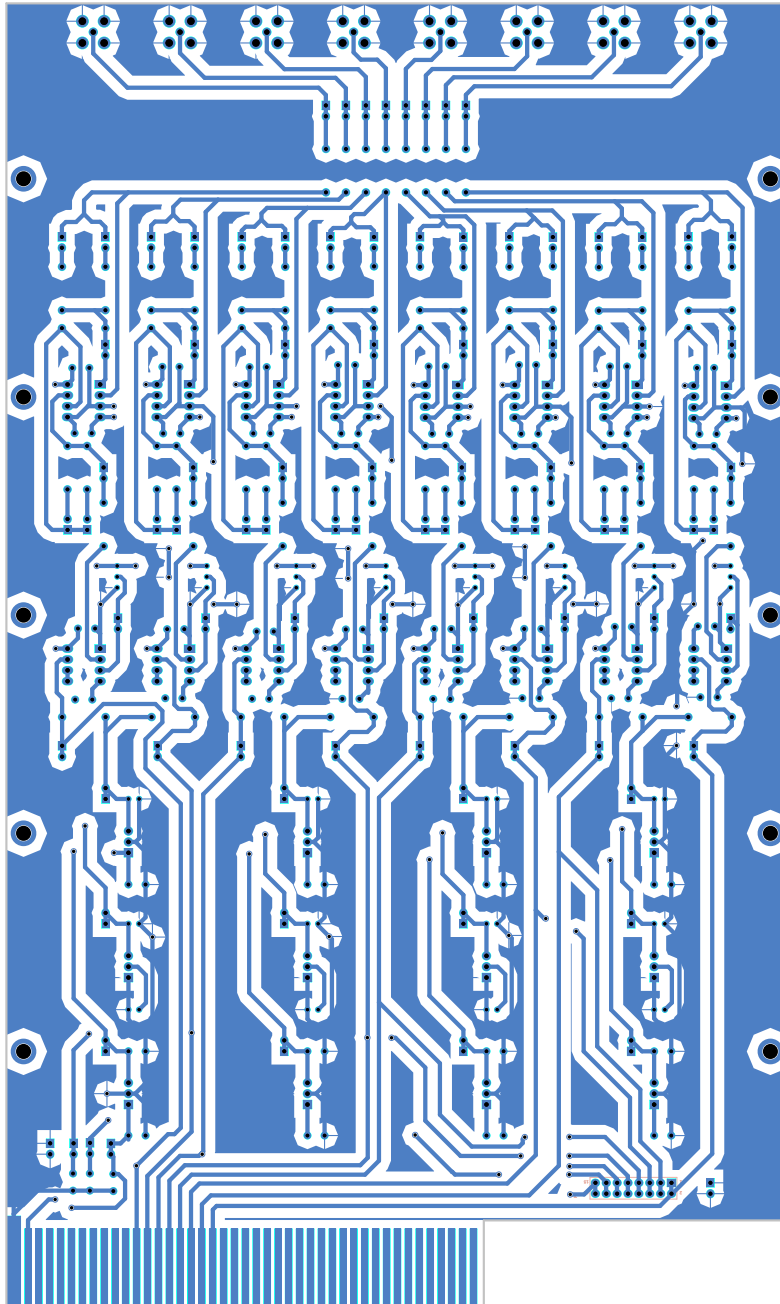


Figura 3.12: Capa inferior de módulo amplificador.

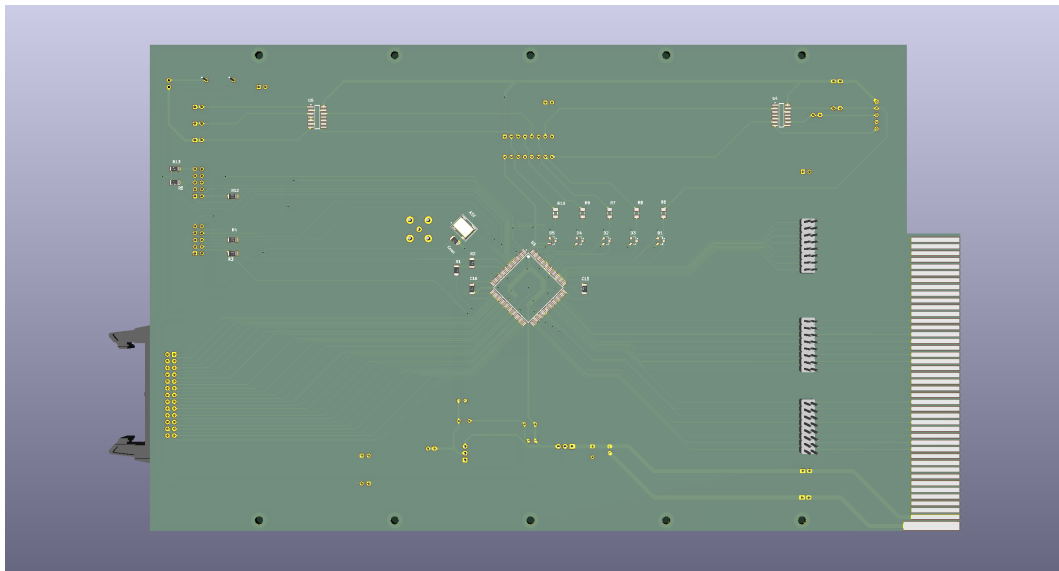
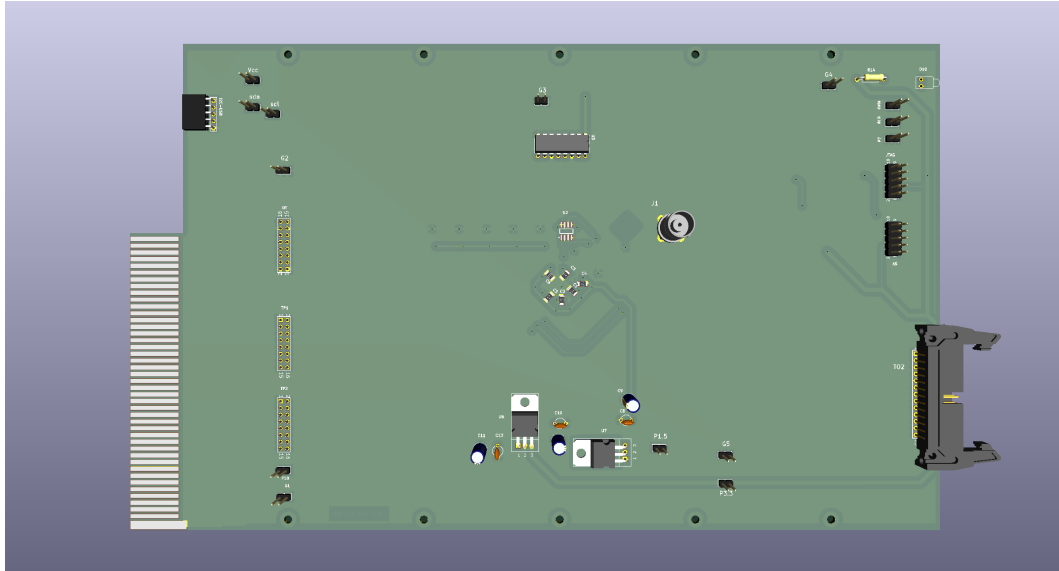


Figura 3.13: Visualización 3D de módulo contador.

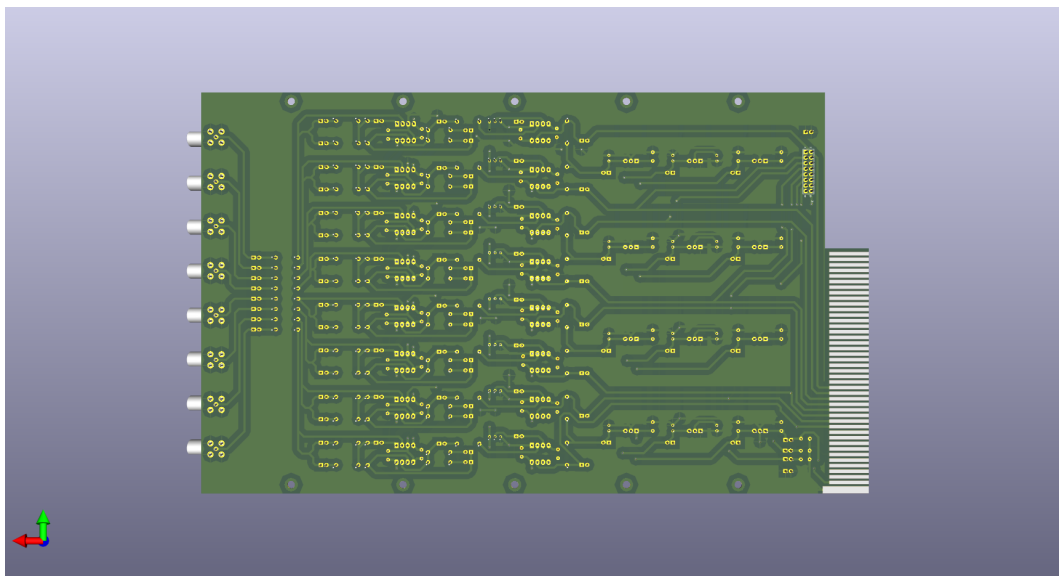
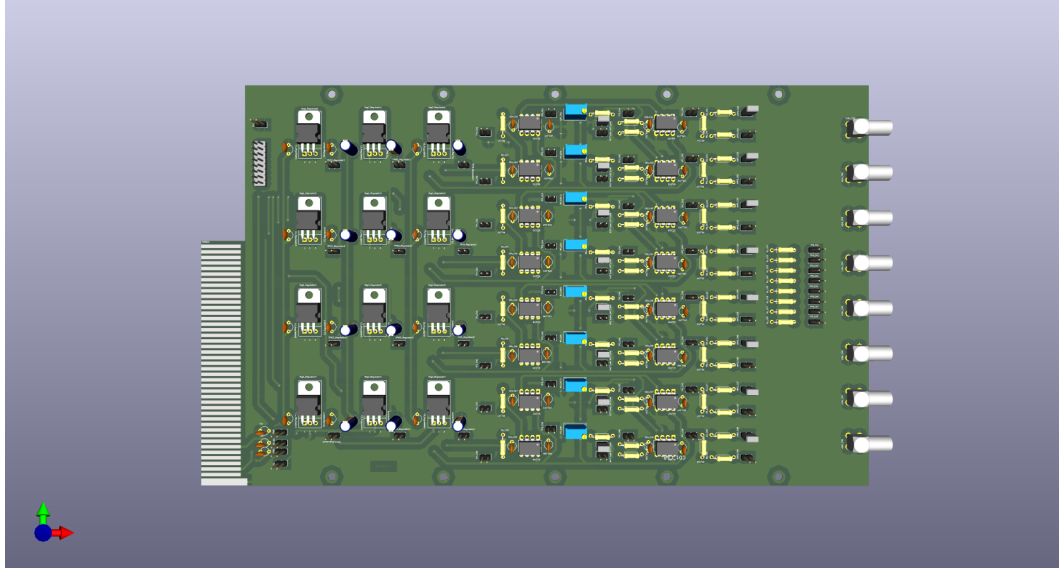


Figura 3.14: Visualización 3D de módulo amplificador.

CAPÍTULO 4

Análisis de datos

Para poder verificar si la sustitución del sistema de adquisición ha sido efectiva, debemos hacer una comparación de los datos. Esta comparación puede realizarse tanto de forma cualitativa como de forma cuantitativa, en estos análisis se usan herramientas como la correlación, histogramas y pruebas de bondad de ajuste. Dentro del campo de la física de partículas, estas herramientas son de las más usadas junto con las distribuciones de Poisson, la binomial y la de Gauss (normal).

4.1. Series de tiempo de neutrones

Para el comienzo del análisis, se comparan los datos obtenidos por los sistema de adquisición, creando algunas gráficas de los datos en el tiempo de ambos sistemas y podemos observar que la tendencia es la misma en todos los contadores. Al sumar los datos de todos los contadores obtenemos las cuentas de neutrones totales, al graficar nuevamente, los datos totales del NDAQ y VDAQ tienen el mismo comportamiento.

En las Figuras 4.1 a 4.4 se muestran las gráficas del mes de noviembre de 2017. En estas gráficas podemos observar lo que se mencionó anteriormente, que los conteos del sistema de adquisición anterior (VDAQ) están escalados sobre diez.

Las gráficas de los contadores restantes pueden encontrarse en el apéndice A.2. Tanto en las gráficas anteriores como en las siguientes, se han eliminado los datos que tienen errores obvios (datos aislados claramente alejados de la media), ya que para los análisis siguientes afectan los resultados. Una gráfica con estos errores también se muestra en el apéndice A.2.

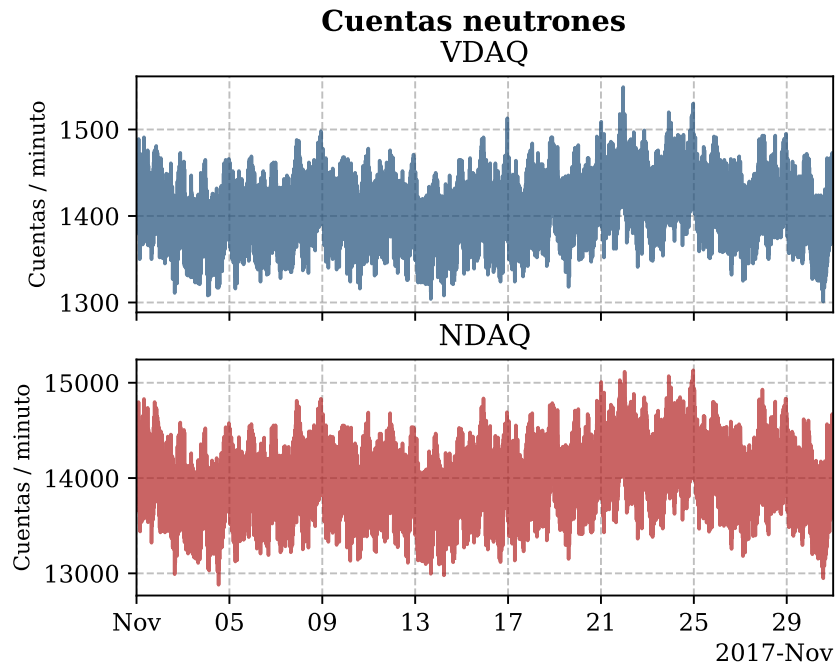


Figura 4.1: Conteos de neutrones de ambos sistemas (Todos los contadores)

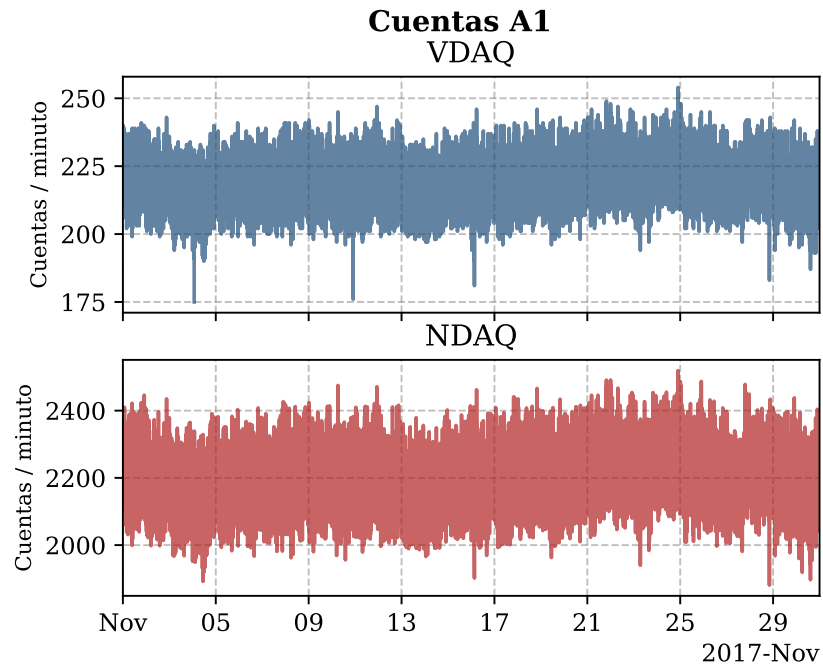


Figura 4.2: Conteos de neutrones de contador A1

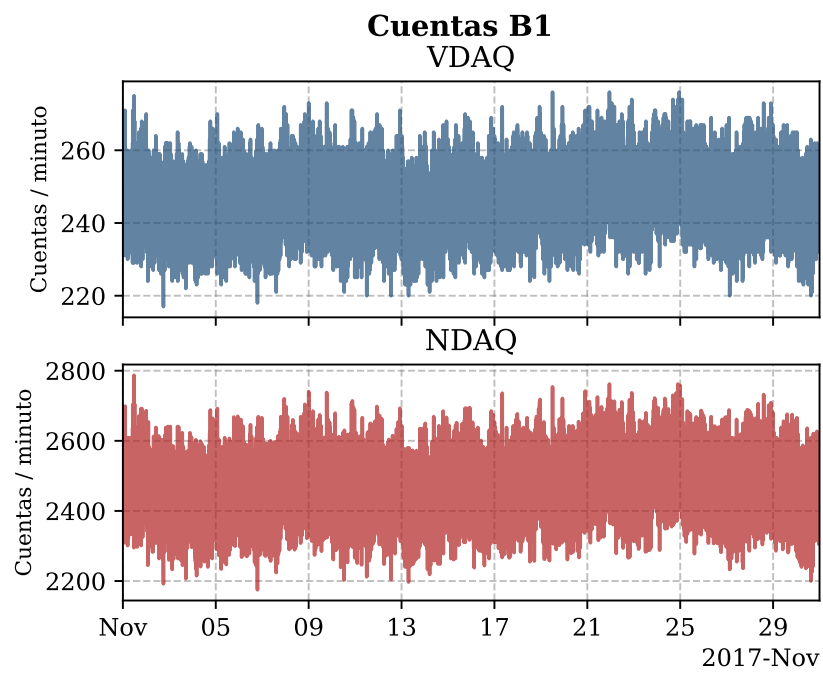


Figura 4.3: Conteos de neutrones de contador B1

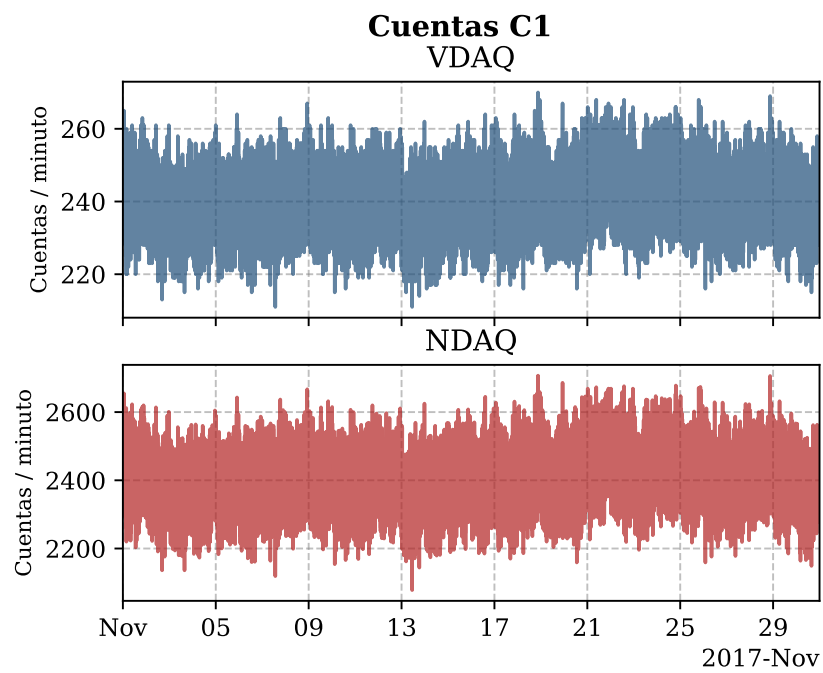


Figura 4.4: Conteos de neutrones de contador C1

4.2. Regresión lineal y correlación

Si obtenemos una gráfica en la que comparemos los datos de ambos sistemas de adquisición y calculamos la recta que mejor describe los datos mediante regresión lineal, obtendremos un valor para su pendiente cerca de diez. Igualmente, si obtenemos el coeficiente de correlación, esperamos un valor muy cercano a uno. El coeficiente de correlación se utiliza para medir el grado en que dos variables cambian en el mismo tiempo. Este describe la dirección y la fuerza de la relación. Aquí se utiliza para medir el grado de concordancia entre los sistemas VDAQ y NDAQ. Debido a la alta tasa de conteos, podemos utilizar el coeficiente de correlación de Pearson, se espera que la relación entre ambos sistemas sea lineal y monótona, aunque si existiera sobre-dispersión, el coeficiente de Spearman nos ayudaría a medir la relación entre ambos.

En las Figuras 4.5 a 4.7, se muestran los datos de ambos sistemas para el mismo contador, se ha calculado la recta de regresión lineal y los coeficientes de correlación.

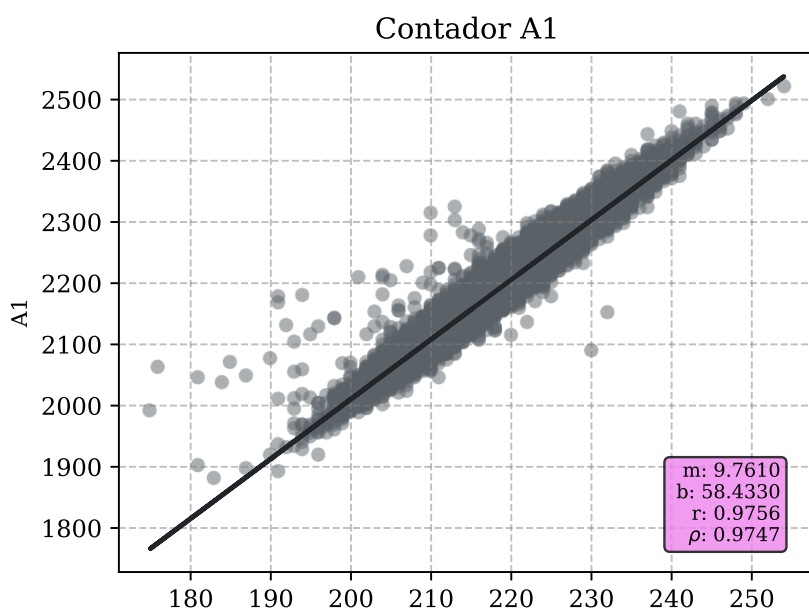


Figura 4.5: Correlación de datos de contador A1

Como se indica en las gráficas, el valor de la pendiente que se obtiene es muy cercano al esperado. No se alcanza el valor de diez, ya que en el escalamiento perdemos cuentas y también el hecho de que sean sistemas diferentes conlleva un error inherente a cada uno. El coeficiente de correlación que se ha obtenido es muy cercano a uno, lo cual indica una fuerte correlación positiva, es decir que los dos sistemas cambian en la misma dirección, también observamos que tanto el coeficiente de correlación de Spearman como el de Pearson es muy similar. En la Tabla 4.1 se muestran los valores calculados para los 6 contadores.

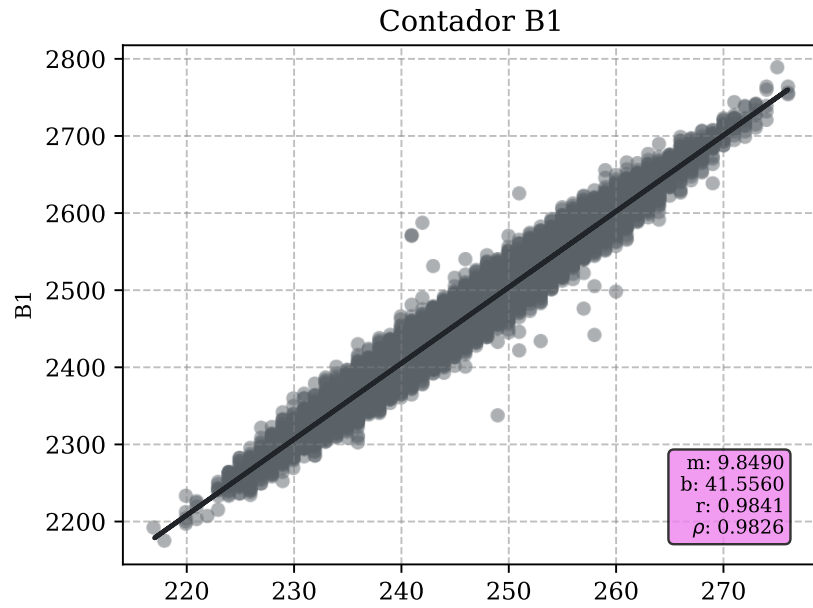


Figura 4.6: Correlación de datos de contador B1

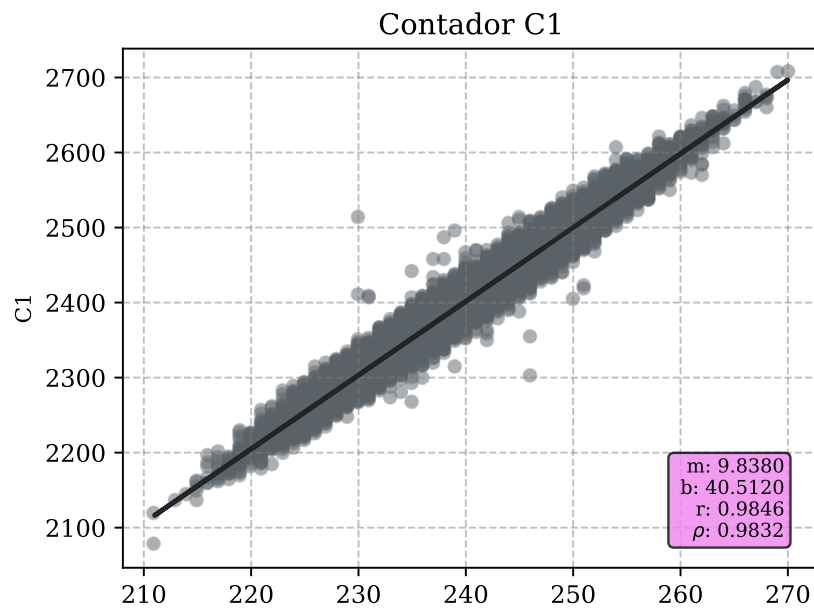


Figura 4.7: Correlación de datos de contador C1

Tabla 4.1: Coeficientes de correlación y parámetros de regresión lineal entre VDAQ y NDAQ para cada contador.

Detector	Pearson (r)	Spearman (ρ)	Pendiente (m)	Ordenada (b)
A1	0,9756	0,9747	9,761	58,433
A2	0,9849	0,9829	9,837	40,538
B1	0,9841	0,9795	9,849	41,556
B2	0,9811	0,9795	9,841	46,430
C1	0,9846	0,9832	9,838	40,512
C2	0,9820	0,9821	9,840	39,722

4.3. Histogramas de error absoluto

Una comparación que se hizo en [10], fue obtener la distribución del error absoluto y para obtenerlo se calculó $Conteos_{NDAQ} - (Conteos_{VDAQ} * m + b)$, el valor de m y b son los valores de la pendiente y ordenada obtenida mediante la regresión lineal. En algunas de sus gráficas se puede apreciar una distribución de error tipo normal con $\mu \approx 0$ y $\sigma \approx 10$. Estas gráficas se incluyen en el apendice A.2.

No todas las gráficas obtuvieron este resultado ya que se reportó que el error se presentó en el VDAQ debido a cuentas fuera de lo normal.

En consecuencia, se realizó la comparación de manera similar con los datos del NDAQ. Las Figuras 4.8 a 4.10, muestran que los histogramas son más cercanos a una distribución normal; sin embargo, debido a que hay varios datos dispersos, el ajuste no ha sido perfecto, aún cuando en todas las gráficas parece tender hacia una distribución normal.

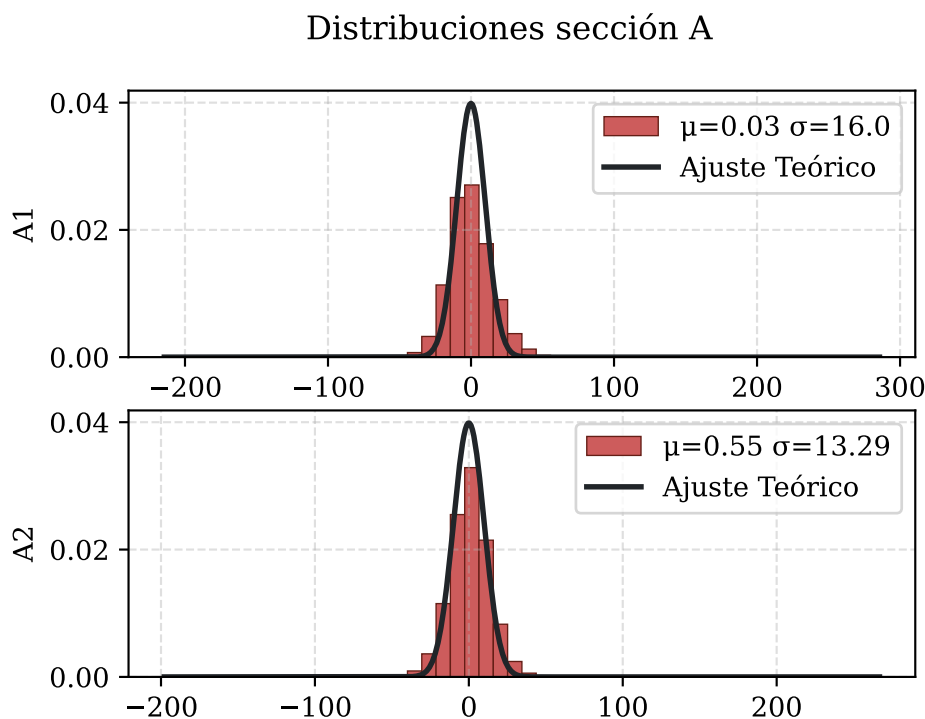


Figura 4.8: Distribución de error en contadores A

Distribuciones sección B

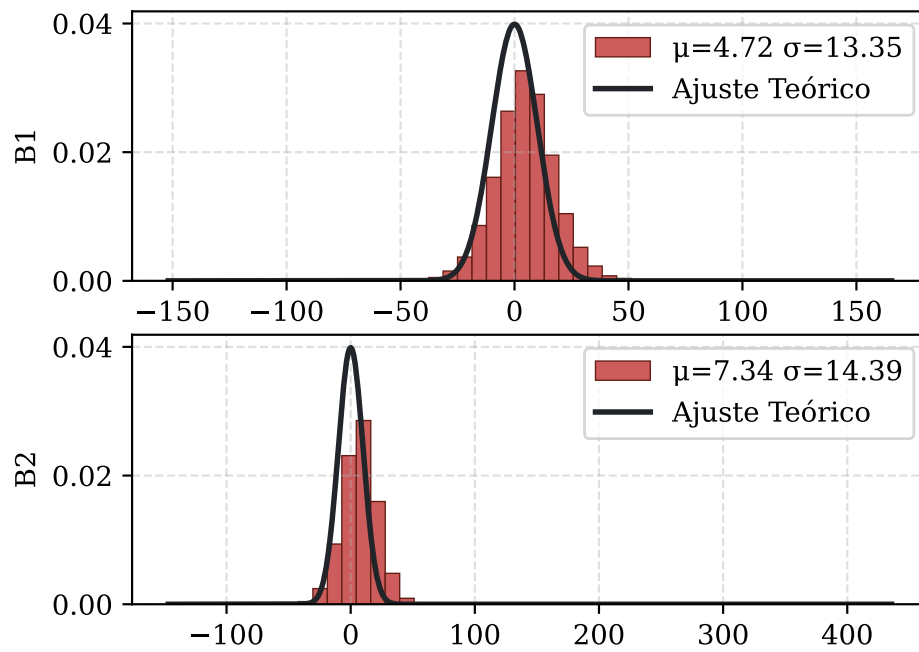


Figura 4.9: Distribución de error en contadores B

Distribuciones sección C

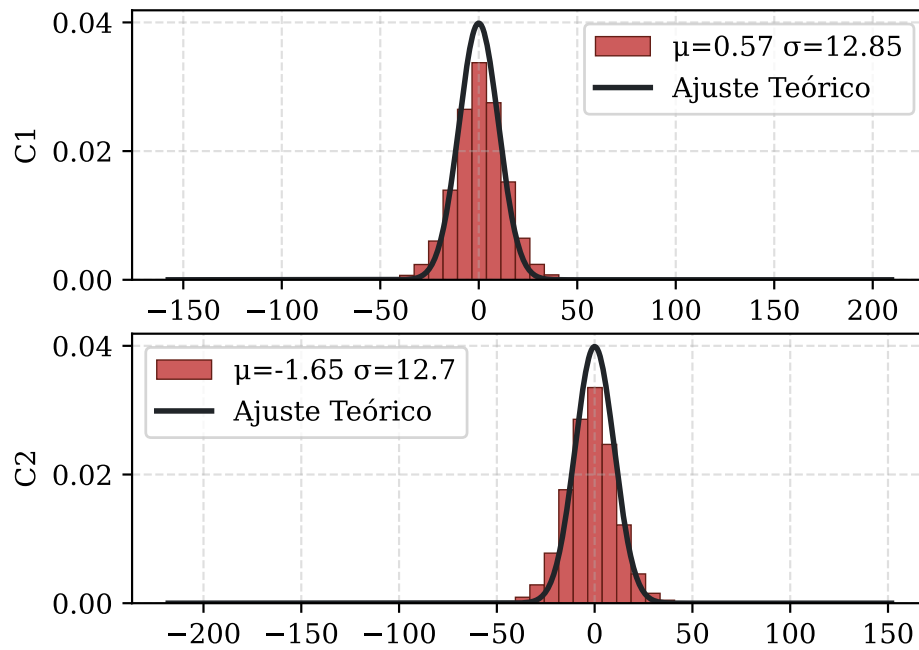


Figura 4.10: Distribución de error en contadores C

4.4. Gráfico Bland-Altman

El gráfico Bland-Altman [2], principalmente utilizado en medicina y biología, su uso ha sido un referente para comparación de dos métodos de medición. El objetivo de este gráfico es mostrar de forma sencilla si los dos métodos son comparables como para que uno pueda reemplazar al otro con la suficiente precisión. Los pasos para este método son los siguientes:

- Graficar los datos, comparando ambos métodos (Figuras 4.5 a 4.7),
- Calcular las diferencias entre los métodos (de la misma forma que para el histograma del error absoluto $NDAQ - VDAQ'$),
- Graficar las diferencias obtenidas contra el promedio $(NDAQ + VDAQ')/2$,
- Determinar los límites dentro de los que se encuentran aproximadamente el 95 % de los datos, $\mu \pm 1,96 * \sigma$ [2] si la distribución de las diferencias es normal, de lo contrario podemos utilizar los percentiles 2,5 % y 97,5 % [4].

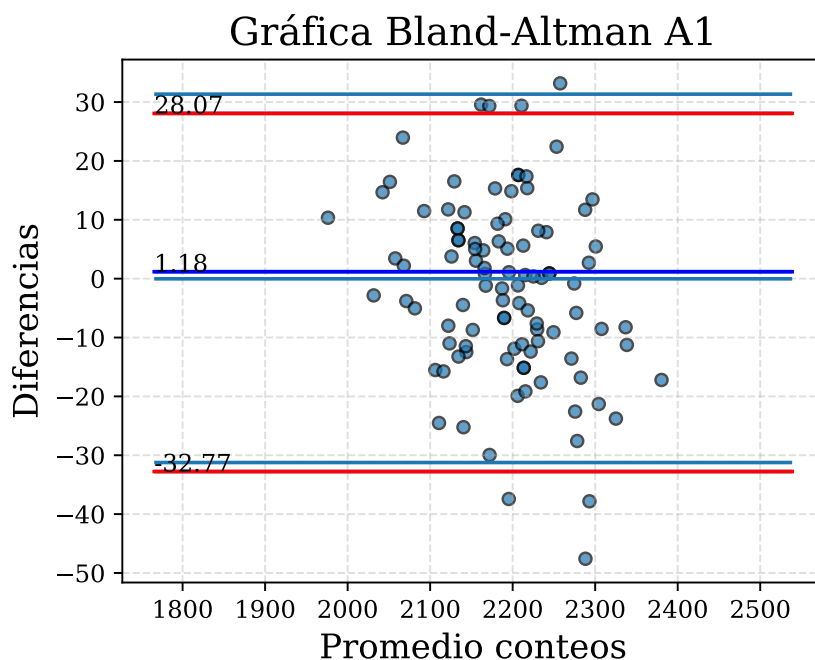


Figura 4.11: Gráfica de Bland-Altman contador A1

En la Figura 4.11 se han calculado las líneas límite siguiendo el método descrito para una submuestra de 100 puntos y se observa que el rango de las diferencias comparado con la tasa de conteos es $<5\%$.

Con estos resultados podemos asegurar que el sistema VDAQ puede ser sustituido por el NDAQ. Los resultados globales se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Puntos Bland-Altman

Detector	Lmite inferior	Lmite superior	Fuera de lmites	Totales	Porcentaje
A1	-32,77	28,10	2150	42 978	5,00
A2	-25,76	25,44	2146	42 978	4,99
B1	-26,80	26,41	2139	42 978	4,98
B2	-27,57	28,43	2146	42 978	4,99
C1	-25,65	25,74	2148	42 978	4,99
C2	-24,88	25,39	2148	42 978	4,99

4.5. Gráfico cuantil cuantil

Es conocido que los fenómenos de decaimiento y arribo de partículas tiene una naturaleza poissoniana [1] [14] cuya función de probabilidad puede ser descrita por:

$$P(X = k) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!} \quad (4.1)$$

donde:

- k es el número de ocurrencias ($k = 0, 1, 2, 3, \dots$)
- λ es el valor esperado de X

El gráfico cuantil cuantil (Q-Q plot en inglés) es una herramienta que permite visualizar la diferencia entre una muestra de datos y una distribución de probabilidad, ya sea teórica o de otra muestra que se usa como comparación. Un cuantil, es un punto en una muestra de datos que la divide en intervalos con la misma probabilidad. La construcción de este gráfico consiste en ordenar los datos de la muestra, obtener los cuantiles correspondientes a los datos, seleccionar una distribución con la que vamos a comparar y obtener sus cuantiles correspondientes. Por último, se grafican los cuantiles de la distribución de comparación contra los cuantiles de la muestra. Si los puntos en la gráfica siguen una línea recta, entonces el gráfico indica que la distribución de los datos es muy similar a la de la distribución de comparación. En caso que no sigan una línea recta, quiere decir que la distribución que usamos para comparar podría no ser la adecuada.

En la Figura 4.12 se observa que los puntos siguen muy bien a una línea recta, más no están sobre la línea teórica de Poisson.

Esto puede deberse a que los datos no son perfectamente poissonianos, en este caso quiere decir que no todas las cuentas que se obtienen son debidas a la interacción de una sola partícula, si no que puede presentar apilamiento de partículas, o a la pérdida de cuentas debido al tiempo muerto del contador, así como al ruido electrónico que puede estar presente en la electrónica de nuestro sistema, lo que puede estar causando una sobredispersión en los datos obtenidos.

La Figura 4.13 muestra claramente que el contador A2 tiene un funcionamiento irregular, ya que la cola a la izquierda de los datos indica que hubo algún tipo de problema (variación de la fuente de alto voltaje, problema en el discriminador).

Las pendientes del resto de los contadores son similares a la de la Figura 4.12 con un valor también cercano a 1,55. Por el teorema del límite central, que sostiene que, conforme incrementa el número de muestras (observaciones), sin importar el tipo

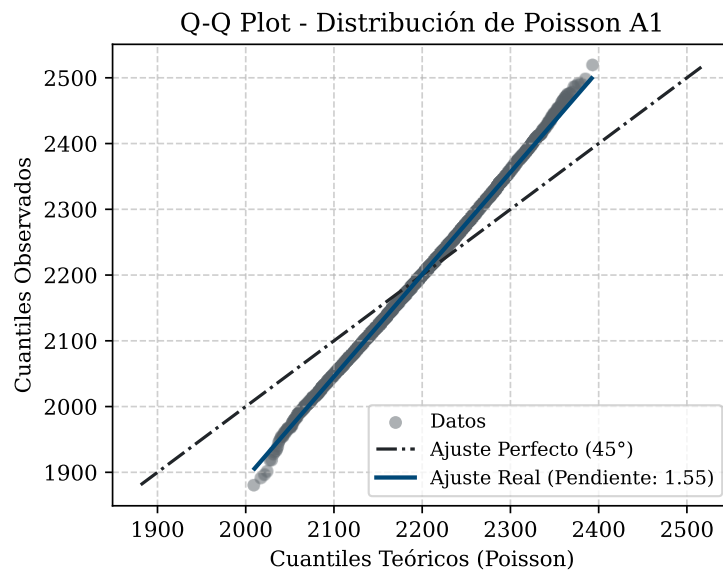


Figura 4.12: Gráfico QQ de A1 con respecto a una distribución de Poisson teórica

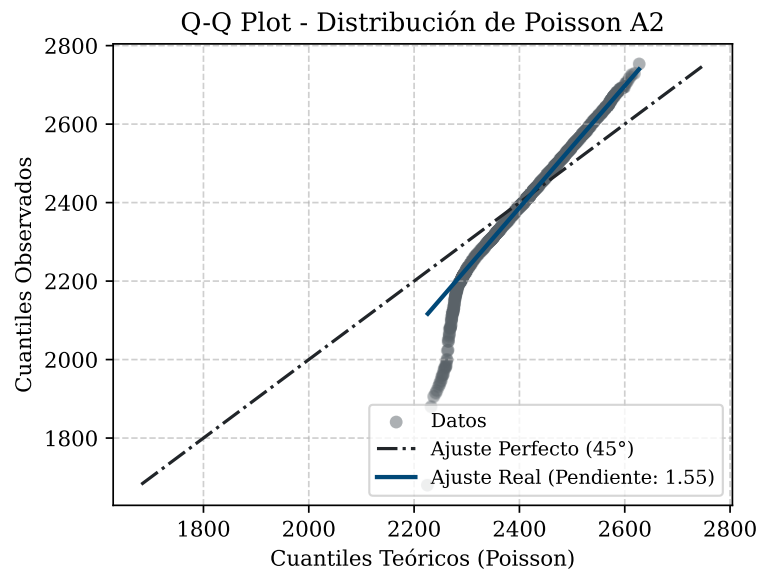


Figura 4.13: Gráfico QQ de A2 con respecto a una distribución de Poisson teórica

de distribución original al que pertenezcan, puede aproximarse a una distribución normal [17]. Para la distribución de Poisson, conforme λ incrementa su valor, la distribución de Poisson se asemeja a una distribución normal [1]. Aprovechando esta propiedad, se grafican los cuantiles de nuestra muestra de datos y los comparamos con una distribución normal teórica.

En la Figura 4.14 podemos comprobar que efectivamente una distribución de Poisson con una media suficientemente grande puede aproximarse a una distribución normal. Nuevamente, en 4.15 observamos que los datos del contador A2 no tienen una dispersión simétrica como debería. El resto de gráficas son como la Figura 4.14

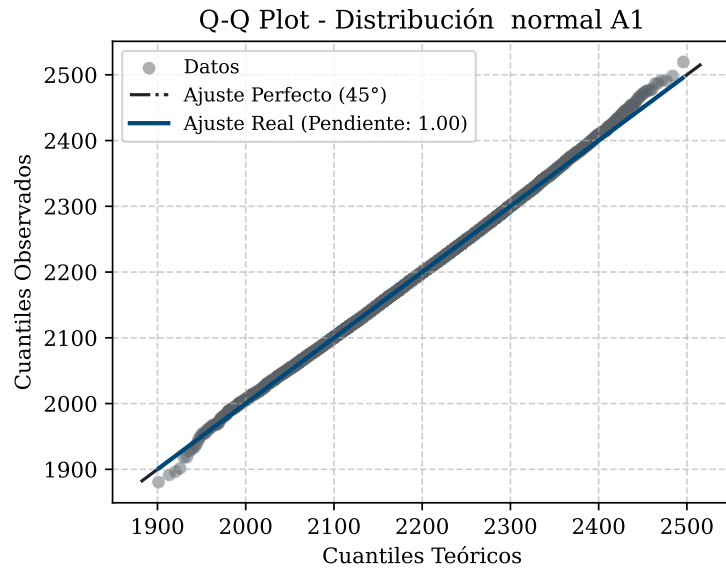


Figura 4.14: Gráfico QQ de A1 con respecto a una distribución de normal teórica

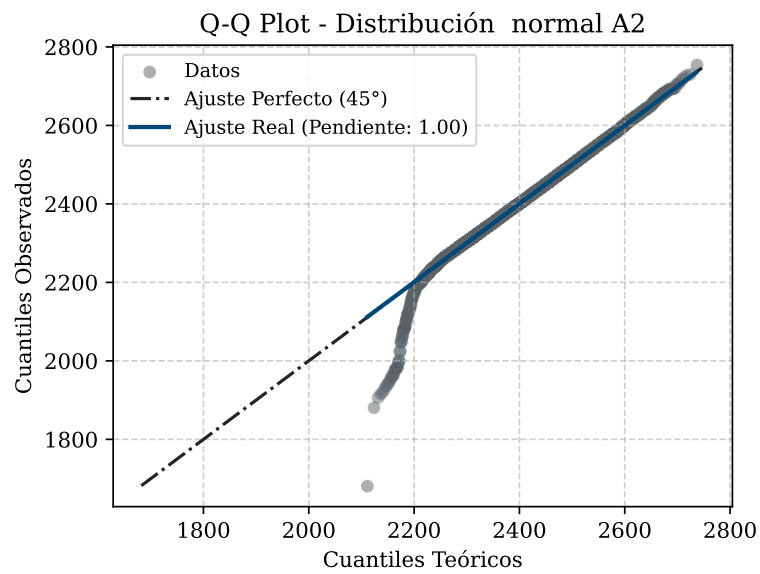


Figura 4.15: Gráfico QQ de A2 con respecto a una distribución de normal teórica

y pueden verse en el apéndice A.2.

4.6. Prueba χ^2

Los análisis anteriores han demostrado que la sustitución de los sistemas de adquisición es válida, ambos sistemas siguen la misma tendencia y las diferencias en los datos es aceptable. Para validar el funcionamiento de los detectores, necesitamos hacer una prueba en la que podamos determinar si los datos obtenidos son válidos. Entre las pruebas estadísticas que son usadas en detectores de radiación, la prueba χ^2 de bondad de ajuste es de las más implementadas [18]. Esta prueba sirve para evaluar si una muestra de datos sigue una distribución teórica específica, como la distribución de Poisson, normal u otra.

Para llevar a cabo esta prueba, es necesario establecer una hipótesis nula (H_0), que sugiere que no hay una diferencia significativa entre las variables que se están comparando, y una hipótesis alternativa (H_1) que supone lo contrario. Es necesario que las observaciones sean independientes, que las frecuencias esperadas sean de por lo menos cinco en cada celda y por último se calcula el valor estadístico χ^2 .

Para obtener el valor estadístico de χ^2 se utiliza la fórmula de su distribución:

$$\chi^2 = \sum_{i=0}^N \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (4.2)$$

donde:

- O_i es el valor observado,
- E_i es el valor esperado,
- χ^2 es el valor estadístico.

Al obtener este valor estadístico podemos compararlo con el valor crítico, si nuestro valor de $\chi_{Calc}^2 < \chi_{Crit}^2$, se rechaza la hipótesis alternativa; si por el contrario $\chi^2 > \chi_{Crit}^2$, se rechaza la hipótesis nula. Una alternativa sería usar el P-valor, que es la probabilidad de observar un valor χ^2 tan extremo o más extremo que el calculado, si H_0 es verdadera. Entonces las comparaciones quedan:

No rechazar H_0	si $\chi_{calc}^2 < \chi_{crit}^2$
Rechazar H_0	si $\chi_{calc}^2 \geq \chi_{crit}^2$
No rechazar H_0	si P-valor $\geq \alpha$
Rechazar H_0	si P-valor $< \alpha$

Para utilizar la ecuación 4.2, se puede construir la Tabla 4.3 que utiliza los datos del 12 de noviembre de 2017 buscando el ajuste a una distribución normal.

Anteriormente se mencionó que las frecuencias esperadas sean de por lo menos cinco, pero una excepción a esta regla general puede usarse cuando ninguna frecuencia esperada es menor a 1 y como máximo el 20 % de la frecuencias esperadas son menor a 5. Esta tabla puede utilizarse sin modificarla; si este no fuera el caso, se combinan bins hasta obtener la frecuencia esperada mínima.

Haciendo uso de la biblioteca *scipy* de python, se pueden obtener el valor crítico y el P-valor mediante las instrucciones:

Tabla 4.3: Prueba χ^2 para contador B1.

Lmite inferior	Lmite superior	Observadas O_i	Probabilidad	Esperadas E_i	$\frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$
2204,0	2241,6	1	0,0012	1,68	0,277
2241,6	2279,2	5	0,0056	8,09	1,180
2279,2	2316,8	25	0,0204	29,34	0,642
2316,8	2354,5	87	0,0557	80,29	0,561
2354,5	2392,1	181	0,1151	165,85	1,385
2392,1	2429,7	260	0,1795	258,61	0,007
2429,7	2467,3	298	0,2113	304,45	0,137
2467,3	2504,9	251	0,1878	270,60	1,420
2504,9	2542,5	191	0,1260	181,58	0,489
2542,5	2580,2	87	0,0638	91,98	0,270
2580,2	2617,8	42	0,0244	35,17	1,325
2617,8	2655,4	9	0,0070	10,15	0,130
2655,4	2693,0	3	0,0015	2,21	0,282
Total		1440	1		8,106

```
from scipy import stats
```

```
chi2_critico = stats.chi2.ppf(0.95, df=10)
```

```
p_valor = 1 - stats.chi2.cdf(chi2_calculado, df=10)
```

El valor $\chi^2_{Crit} = 18,307$ y P-valor = 0,382. Como el valor de $\chi^2_{Calc} < \chi^2_{Crit}$, entonces NO se rechaza H_0 . De igual forma al comparar el P-valor con una significancia $\alpha = 0,05$ concluimos igualmente que H_0 no es rechazada.

En la Tabla 4.4, se muestran los valores obtenidos de la prueba χ^2 .

Tabla 4.4: Parámetros estadísticos para cada detector 2017-11-12

Detector	Media (μ)	Desv. Est. (σ)	G.L. (ν)	χ^2	χ^2_{Crit}
A1	2185,57	66,37	10	15,10	18,307
A2	2412,52	70,15	10	9,95	18,307
B1	2451,53	70,11	10	8,11	18,307
B2	2414,84	68,25	10	9,59	18,307
C1	2385,50	65,00	10	17,51	18,307
C2	2153,11	66,60	10	12,40	18,307

Se hace igualmente una prueba χ^2 para el día 27 de junio de 2026, para verificar que los datos sigan siendo confiables. Los resultados se muestran en la Tabla 4.5

En esta prueba, el detector B1 obtuvo un valor por arriba, pero muy cercano a el valor crítico, la posible explicación es que hay algunos datos más alejados de la media que han incrementado el valor de χ^2 [1]. Aún podemos confiar en los datos.

Tabla 4.5: Parámetros estadísticos para cada detector 2026-06-27

Detector	Media (μ)	Desv. Est. (σ)	G.L. (ν)	χ^2	χ^2_{Crit}
A1	2066,07	63,30	7	12,47	14,07
A2	2322,00	67,73	7	10,77	14,07
B1	2357,20	66,97	5	11,42	11,07
B2	2339,10	64,08	7	7,18	14,07
C1	2282,41	66,94	6	3,62	12,59
C2	2077,00	63,25	7	8,85	14,07

4.7. Comparación de datos con respecto a otros monitores de neutrones

Una última prueba que se puede realizar es de manera empírica. Como se mencionó anteriormente el MN-CDMX pertenece a una red mundial, esto nos permite comparar nuestros datos con los de diferentes estaciones situadas en diferentes partes y condiciones del mundo. Aún cuando los datos no tendrán ni la misma magnitud ni la misma frecuencia de conteo, todos muestran la misma tendencia en los conteos. En la Figura 4.16, se muestran datos del 27 de marzo al 1 de mayo de 2026 de las estaciones del Polo Sur (SOPO), Oulu (OULU) y México (MXCO). Se puede observar como las tres estaciones, sin ser idénticas, tienen la misma forma.

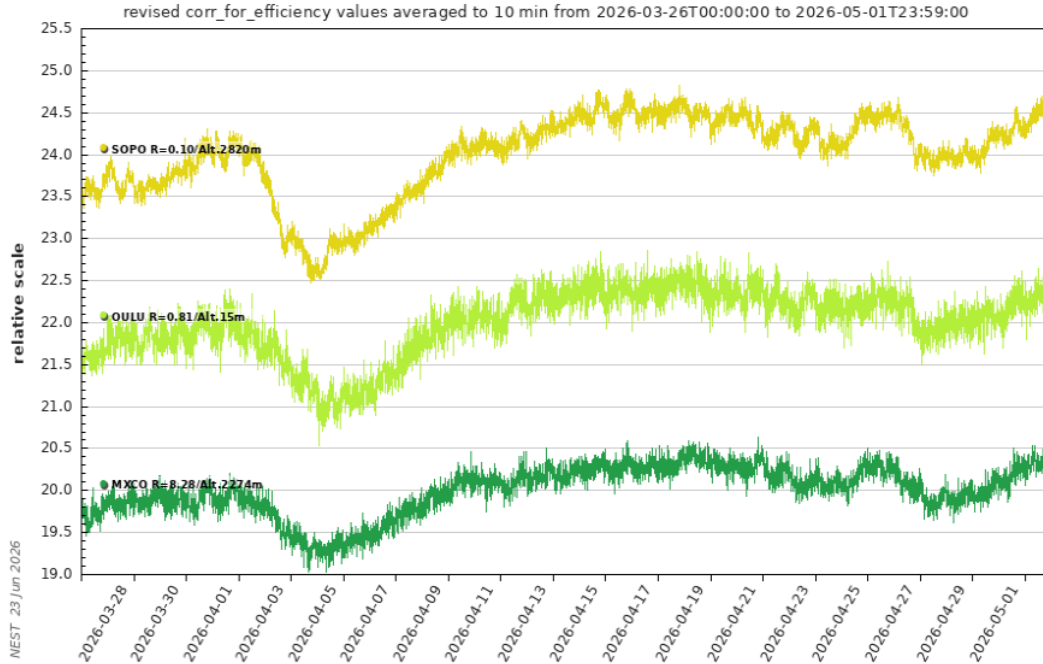


Figura 4.16: Gráfica NMDB abril de 2026 con SOPO, OULU y MXCO [15]

Otra prueba importante del funcionamiento del MN-CDMX, se da en la Figura 4.17. En ella, se muestra un fenómeno conocido como *decrecimiento Forbush*, este fenómeno se da cuando el Sol expulsa una gran cantidad de plasma que se expande por todo el medio interplanetario, este plasma tiene propiedades magnéticas que al

4.7. COMPARACIÓN DE DATOS CON RESPECTO A OTROS MONITORES DE NEUTRONES⁴³

pasar cerca de la Tierra, desvían parte de los rayos cósmicos que se detecta en los instrumentos terrestres como un decrecimiento en las cuentas de los detectores.

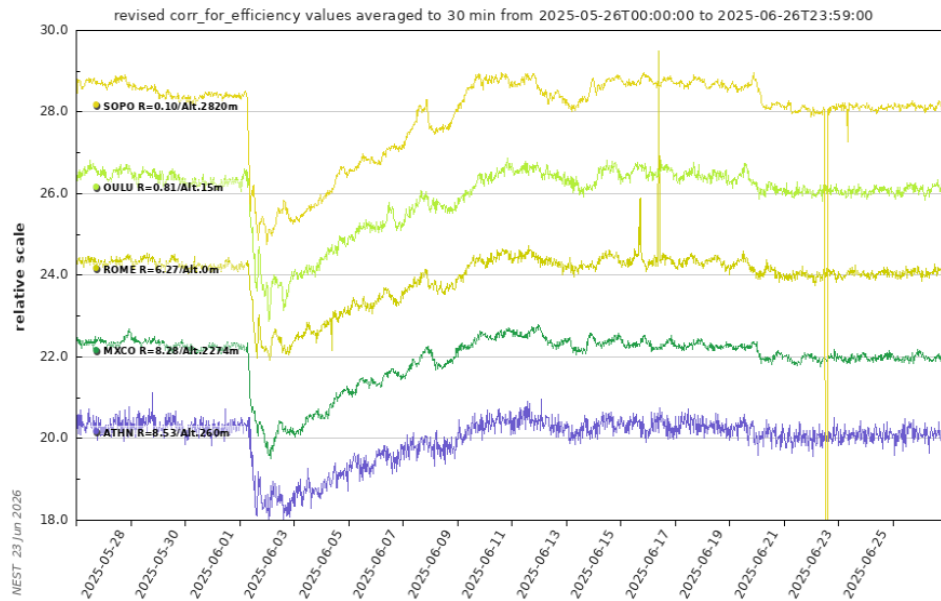


Figura 4.17: Evento Forbush junio 2025 [15]

Por último se muestra una gráfica del sitio web del MN-CDMX en la Figura 4.18.

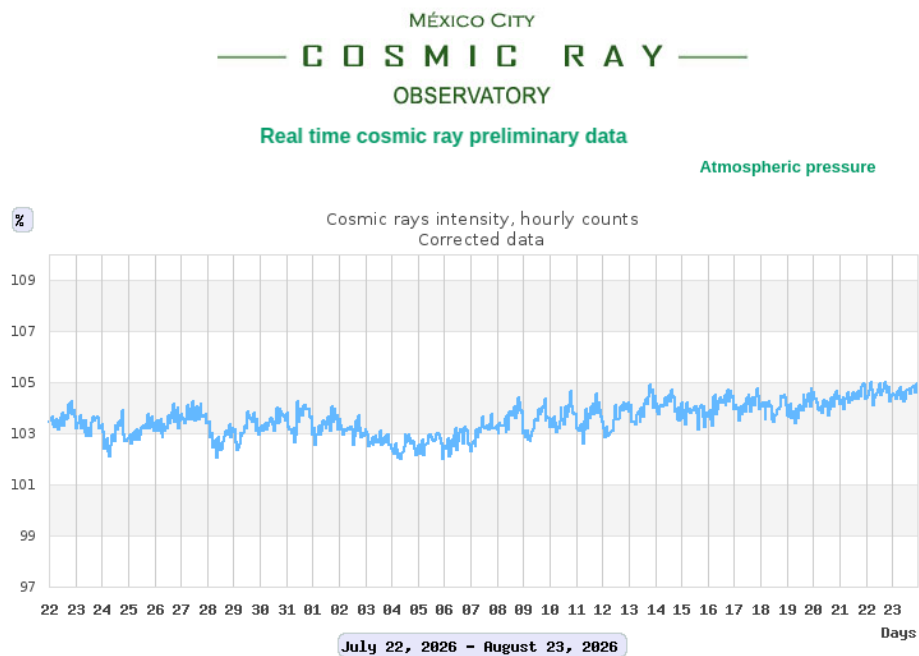


Figura 4.18: Últimos datos en sitio web del MN-CDMX

4.8. Conclusiones

Con la implementación y análisis del nuevo sistema de adquisición de datos del Monitor de Neutrones de la Ciudad de México, podemos concluir:

- La modernización del hardware de adquisición ha sido exitosa. El empleo de las mejores prácticas en el diseño de PCBs ha hecho que la transición hacia un sistema moderno y adaptable asegure el continuo funcionamiento de los detectores.
- La comparación de ambos sistemas de adquisición demostró que el NDAQ es una buena alternativa al sistema anterior, con la ventaja que el hardware seguirá operando aún cuando la plataforma del software siga modernizándose gracias a la comunicación mediante USB. También, al continuar con un sistema modular, la reparación o sustitución de módulos es sencilla.
- La prueba estadística χ^2 realizada, demostró la validez de los datos obtenidos y se comprobó que la estabilidad de los conteos se preserva.
- Con la comparación con otros detectores del NMDB, se confirmó que el comportamiento del MN-CDMX es consistente con lo que se reporta a nivel mundial.

4.9. Trabajo futuro

Los preamplificadores son parte importante del MN-CDMX ya que hacen una primera discriminación de los pulsos obtenidos por el detector. Asegurar que su funcionamiento es adecuado es importante para asegurar la calidad de los datos

- [1] Syed Naeem Ahmed. *Physics and Engineering of Radiation Detection*. Academic Print Inc. Elsevier, 2007. ISBN: 978-0-12-045581-2.
- [2] D.G. Altman y J.M. Bland. «Measurement in Medicine: The Analysis of Method Comparison Studies». En: *Journal of the Royal Statistical Society. Series D (The Statistician)* 32.3 (1983), págs. 307-317. ISSN: 00390526, 14679884.
- [3] Carl D. Anderson. «The Positive Electron». En: *Phys. Rev.* 43 (6 1933), págs. 491-494. DOI: 10.1103/PhysRev.43.491. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.43.491>.
- [4] J.M. Bland y D.G. Altman. «Measuring agreement in method comparison studies.» En: *Stat Methods Med Res.* 8.2 (jun. de 1999), págs. 135-160. DOI: 10.1177/096228029900800204.
- [5] Per Carlson y Alessandro De Angelis. «Nationalism and internationalism in science: the case of the discovery of cosmic rays». En: *The European Physical Journal H* 35.4 (mar. de 2011), págs. 309-329. ISSN: 2102-6467. DOI: 10.1140/epjh/e2011-10033-6. URL: <http://dx.doi.org/10.1140/epjh/e2011-10033-6>.
- [6] Hatton Carmichael. *IQSY Instruction Manual No. 7*. 1964.
- [7] *Cosmic rays: particles from outer space*. URL: <https://home.cern/science/physics/cosmic-rays-particles-outer-space/>.
- [8] Alessandro De Angelis. «Cosmic Rays: studies and measurements before 1912». En: *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements* 239-240 (2013). Proceedings of the 9th workshop on Science with the New Generation of High Energy Gamma-ray Experiments: From high energy gamma sources to cosmic rays, one century after their discovery, págs. 3-10. ISSN: 0920-5632. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2013.05.001>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920563213003587>.
- [9] Lev I. Dorman. *Cosmic Rays in the Earth's Atmosphere and Underground*. 1.^a ed. Springer Dordrecht, 2013, págs. XXXII, 862. ISBN: 978-1-4020-2113-8. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2113-8>.

- [10] Marcos A. García Ginez Rocío y Anzorena Méndez. «Diseño e implementación de un sistema de adquisición de datos para el Observatorio de Rayos Cósmicos de Ciudad Universitaria». Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2011.
- [11] Rocío García Ginez. «Estimación del Espectro de Alturas de Pulsos con corrección del efecto apilamiento para el Monitor de Neutrones 6NM-64». Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2014.
- [12] Shaden S. Hernández Anaya. «Variaciones en los Rayos Cósmicos Detectados por el Observatorio de Rayos Cósmicos de la CDMX Asociadas con Tormentas Geomagnéticas Durante el Ciclo Solar 24». Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias, 2018.
- [13] Maurice Hubert. *Paul Eisler*. Multitech UK. URL: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?curid=25513263>.
- [14] William R. Leo. *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments. A How-to Approach*. Second Revised Edition. Springer-Verlag Berlin Heideberg, New York, 1994. ISBN: 978-3-540-57280-0. DOI: 10.1007/978-3-642-57920-2.
- [15] *NMDB data*. URL: <https://nmdb.eu/nest>.
- [16] *NMDB Public Outreach*. URL: https://nmdb.eu/public_outreach/es/.
- [17] *openstax online*. URL: <https://openstax.org/books/introduccion-estadistica-empresarial/pages/7-2-uso-del-teorema-del-limite-central> (visitado 15-06-2026).
- [18] John R. Prince. «Goodness-of-Fit Tests for Describing the Statistical Behavior of Nuclear Counting Equipment». En: *Journal of Nuclear Medicine Technology* 5.1 (1977), págs. 41-45. ISSN: 0091-4916. eprint: <https://tech.snmjournals.org/content/5/1/41.full.pdf>. URL: <https://tech.snmjournals.org/content/5/1/41>.
- [19] John A. Simpson. «The Cosmic Ray Nucleonic Component: The Invention and Scientific Uses of the Neutron Monitor - (Keynote Lecture)». En: *Space Science Reviews* 93.4 (2000), págs. 11-32. ISSN: 1572-9672. DOI: 10.1023/A:1026567706183. URL: <https://doi.org/10.1023/A:1026567706183>.
- [20] Johnson Howard W y Graham Martin. *High-Speed Digital Design. A Handbook of Black Magic*. Prentice Hall PTR Englewoods Cliffs New Jersey.

Índice de figuras

1.1.	Electroscopio de finales del siglo XVIII	1
1.2.	Gráficas de resultados de Hess y Korlhörster	3
1.3.	Traza de un positrón en una cámara de niebla	4
1.4.	Chubasco atmosférico	6
2.1.	Detector de ionización básico	7
2.2.	Modo de operación de detector de ionización	8
2.3.	Avalancha típica en un detector de ionización	9
2.4.	Estructura detector 6-NM64	11
2.5.	Carátula del viejo sistema de adquisición	11
3.1.	Paul Eisler, radio con PCB	13
3.2.	Anotaciones en esquemático	15
3.3.	Diagrama del MN-CDMX	16
3.4.	Circuito de prueba NDAQ	16
3.5.	Prototipo de PCB NDAQ	17
3.6.	Diagramas del Hardware del NDAQ	18
3.7.	Dimensiones de PCB.	21
3.8.	Módulos de NDAQ funcionando.	22
3.9.	Capa superior de módulo contador.	23
3.10.	Capa inferior de módulo contador.	24
3.11.	Capa superiores de módulo amplificador.	25
3.12.	Capa inferior de módulo amplificador.	26
3.13.	Visualización 3D de módulo contador.	27
3.14.	Visualización 3D de módulo amplificador.	28
4.1.	Cuentas totales de los detectores	30
4.2.	Cuentas A1	30
4.3.	Cuentas B1	31
4.4.	Cuentas C1	31
4.5.	Correlación de datos de contador A1	32
4.6.	Correlación de datos de contador B1	33

4.7. Correlación de datos de contador C1	33
4.8. Distribución de error en contadores A	34
4.9. Distribución de error en contadores B	35
4.10. Distribución de error en contadores C	35
4.11. Gráfica de Bland-Altman contador A1	36
4.12. Gráfico QQ de A1 con respecto a una distribución de Poisson teórica	38
4.13. Gráfico QQ de A2 con respecto a una distribución de Poisson teórica	38
4.14. Gráfico QQ de A1 con respecto a una distribución de normal teórica	39
4.15. Gráfico QQ de A2 con respecto a una distribución de normal teórica	39
4.16. Gráfica NMDB abril 2026	42
4.17. Evento Forbush junio 2025	43
4.18. Sitio web MN-CDMX	43
A.1. Conteos de neutrones de contador A2	50
A.2. Conteos de neutrones de contador B2	51
A.3. Conteos de neutrones de contador C2	51
A.4. Correlación de datos de contador A2	52
A.5. Correlación de datos de contador B2	52
A.6. Correlación de datos de contador C2	53
A.7. Distribuciones de error A1, A2 y B1	54
A.8. Distribuciones de error B2, C1 y C2	55

Índice de tablas

3.1. Componentes módulo contador.	20
3.2. Componentes módulo amplificación (1 canal)	20
4.1. Coeficientes de correlacion	33
4.2. Puntos Bland-Altman	37
4.3. Prueba chi cuadrada para B1	41
4.4. Parámetros estadísticos para cada detector 2017-11-12	41
4.5. Parámetros estadísticos para cada detector 2026-06-27	42

APÉNDICE A

Apéndice A

A continuación se muestran las gráficas de tiempo del resto de los contadores proporcionales.

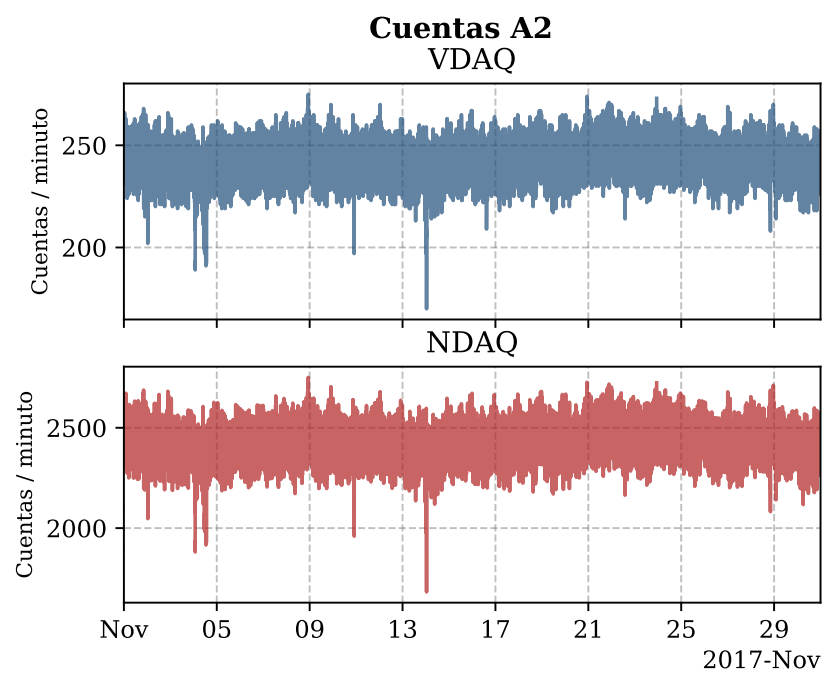


Figura A.1: Conteos de neutrones de contador A2

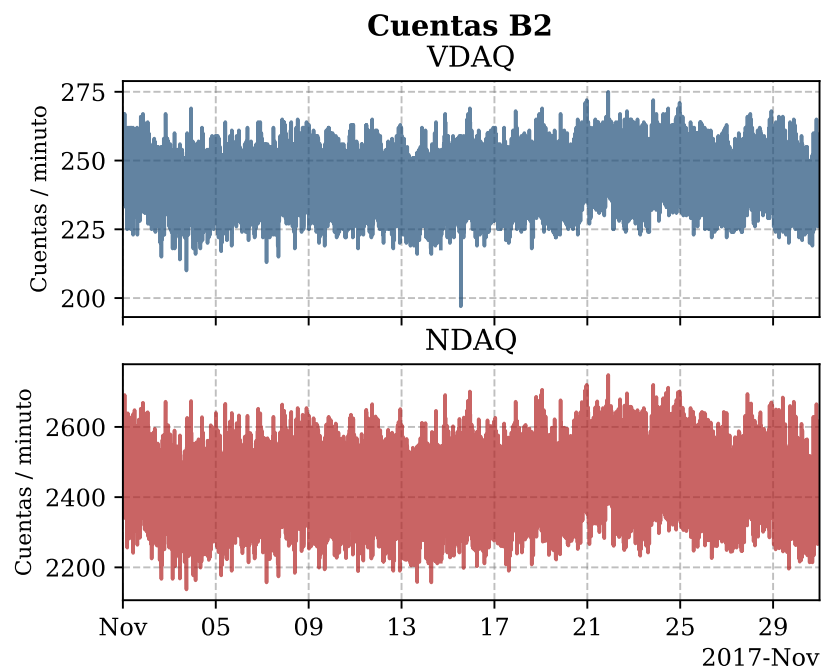


Figura A.2: Conteos de neutrones de contador B2

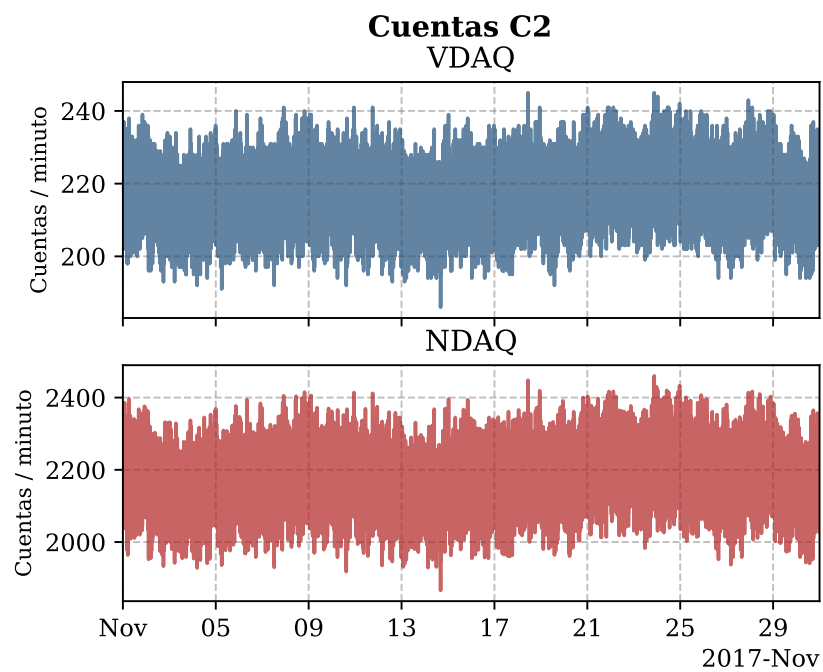


Figura A.3: Conteos de neutrones de contador C2

A.1. Gráficas de regresión lineal

Las gráficas de regresión lineal, muestran una fuerte correlación aun cuando tiene algunos datos mas alejados de lo esperado.

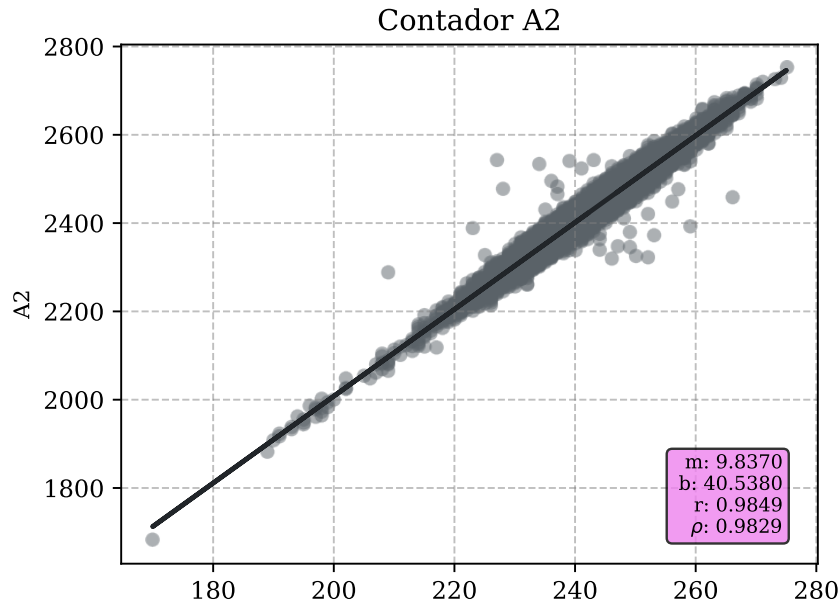


Figura A.4: Correlación de datos de contador A2

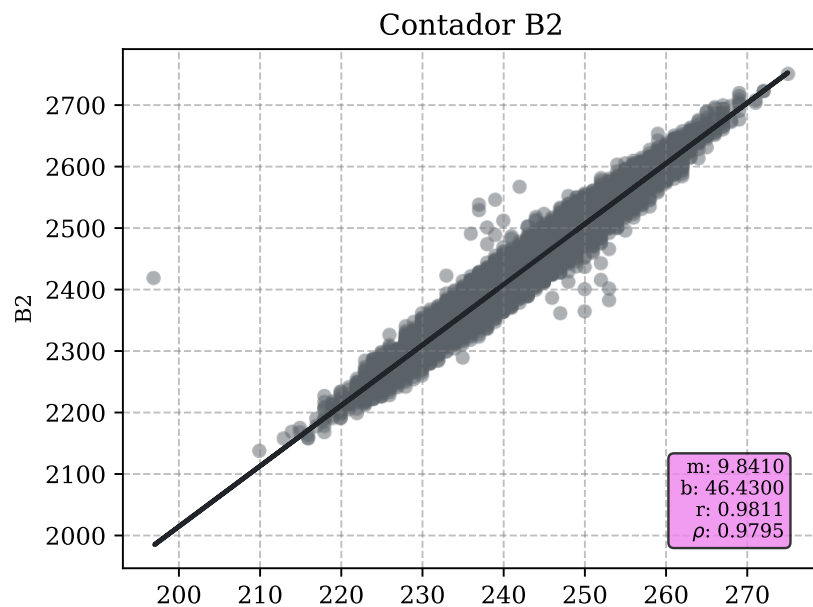


Figura A.5: Correlación de datos de contador B2

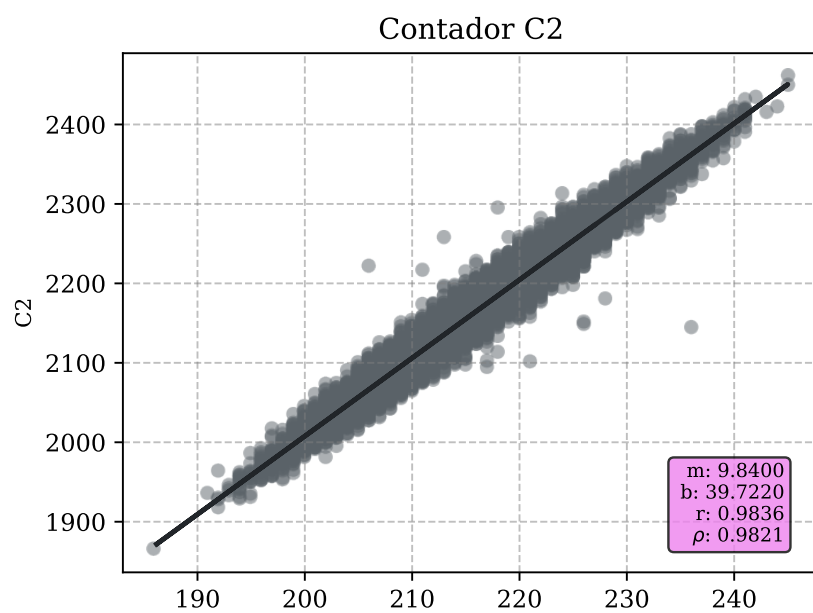


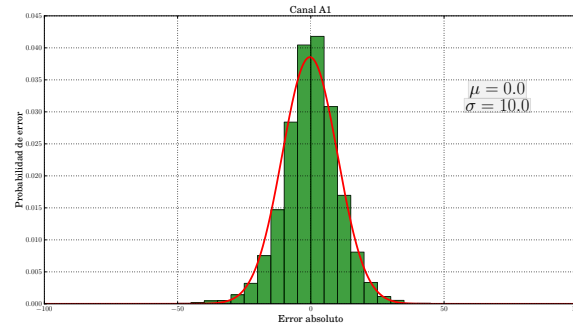
Figura A.6: Correlación de datos de contador C2

A.2. Gráficas de error absoluto

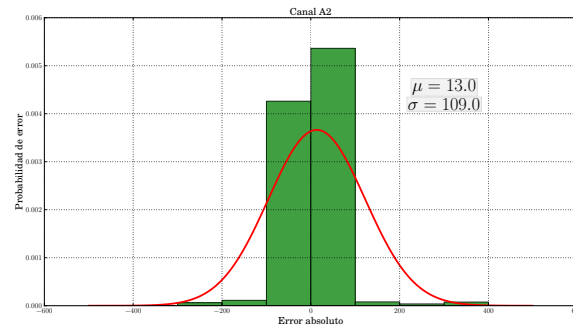
Se muestran las gráficas obtenidas por [10]

Resultados

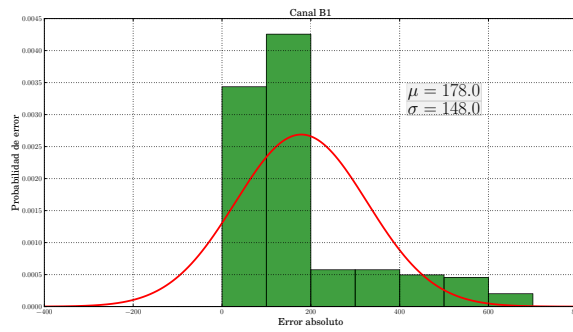
74



(a) Distribución canal A1



(b) Distribución canal A2

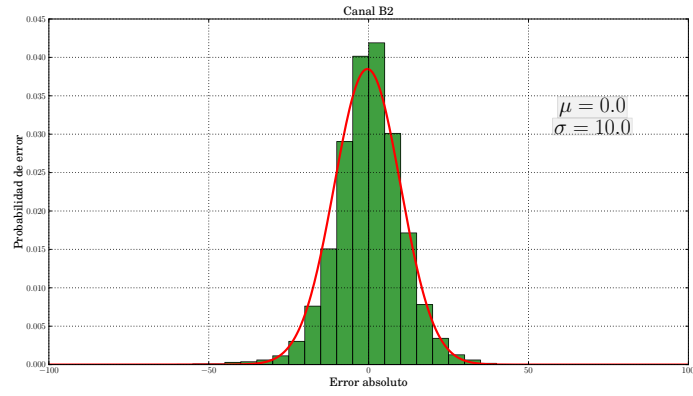


(c) Distribución canal B1

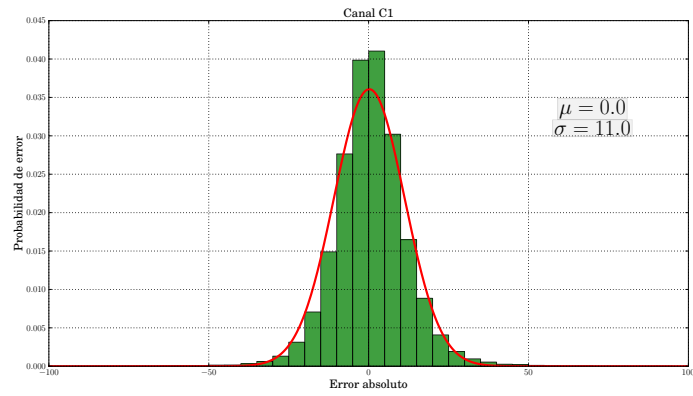
Figura A.7: Distribuciones de error absoluto A1, A2 y B1 de [10].

Resultados

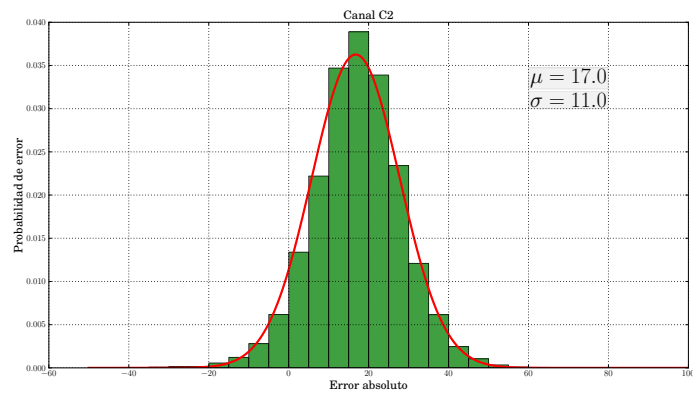
75



(a) Distribución canal B2



(b) Distribución canal C1



(c) Distribución canal B2

Figura A.8: Distribuciones de error absoluto B2, C1 y C2 de [10].