

Caracterización de la respuesta de la electrónica de AMIGA del Observatorio Pierre Auger

Ajustando los parámetros de las simulaciones del código oficial a la respuesta observada en los detectores instalados en el Observatorio

Lautaro Silva

Laboratorio 6
Dept. de Física – FCEyN - UBA

Agosto 2024

Datos del alumno

- **ALUMNO:**

Lautaro Silva – LU N° : 879/21
E-mail: smiling.tarito2@gmail.com

- **LUGAR DE TRABAJO:** ITeDA, Centro Atómico Constituyentes, CNEA
<https://www.iteda.cnea.gov.ar/>

- **DIRECTOR DEL TRABAJO:** Federico Sanchez
E-mail: federico.sanchez@iteda.cnea.gov.ar

- **CODIRECTOR o COLABORADOR:** Alan Fuster
E-mail: alan.fuster@iteda.cnea.gov.ar

- **FIRMAS Y ACLARACIONES DE ALUMNOS Y DIRECTORES**

Resumen

Durante esta primera etapa del proyecto se trabajaron dos líneas complementarias para llegar a la caracterización de la respuesta de la electrónica del proyecto AMIGA. La primera linea consistió en el análisis de la electrónica del experimento, analizando la respuesta en frecuencia de sus componentes principales. A tal fin se hizo uso del programa LTSPice y de mediciones en el laboratorio. La segunda linea se trató del desarrollo y modelado de las señales de fotones individuales (*Single-Photo-Equivalent, SPE*, por sus siglas en inglés), y de señales complejas dadas por la superposición de muchos SPE como lo son las señales producidas por muones. Estas dos líneas se combinaron, luego, para analizar la respuesta *end-to-end* de la cadena de adquisición de la electrónica de AMIGA y así poder compararla con aquella que está en el código oficial de la colaboración. El objetivo fue reproducir primero y entender, después, las discrepancias que se observan entre lo predicho por las simulaciones oficiales y los datos adquiridos en los últimos años por AMIGA. En síntesis, en esta primera etapa se buscó reproducir con un código independiente y acorde a mediciones corroborables de laboratorio, la respuesta modelada en el código oficial de la colaboración Auger. Quedará pendiente, para la segunda etapa de investigación del presente plan de trabajo, hallar el origen (ya sea en el modelado de señales o en electrónica) de las discrepancias y proponer una solución al problema.

Particularmente, se logró simular y caracterizar la electrónica del integrado Citiroc 1A usada por el detector de muones del proyecto AMIGA analizando su respuesta en frecuencias, analizando dos de sus componentes, el Pre-Amplificador de Alta Ganancia y el Fast-Shaper. Se modeló el Pre-Amplificador como un filtro pasa-bajos con una frecuencia de corte de $(9,1 \pm 0,1) \times 10^6$ Hz y el Fast-Shaper como un filtro pasa-banda con una frecuencia pico de $(12,9 \pm 0,1) \times 10^6$ Hz. También se comenzaron a realizar mediciones en el laboratorio sobre el circuito integrado Citiroc 1A para analizar directamente su respuesta en frecuencia. Se trabajó sobre el modelado y la creación de pulsos de fotones individuales (SPE) y pulsos de muones conformados por muchos SPE's usando Python, y con estas herramientas se calculó el valor adecuado del *threshold* para el discriminador de la electrónica, último componente de la cadena de adquisición antes de que el FPGA muestree los pulsos y genere las señales binarias de AMIGA. Finalmente, a partir de todo eso, se logró rehacer y recuperar el histograma de frecuencia de cantidad de muestreos positivos (o #1's) en las señales de muones.

1. Introducción

Rayos Cósmicos

Este trabajo se enmarca en el proyecto AMIGA de detección directa de muones dentro del Observatorio Pierre Auger para el estudio rayos cósmicos de energía superior a 10^{17} eV. Los rayos cósmicos son núcleos atómicos (pueden ser protones o núcleos más pesados, llegando ser hasta Hierro) que llegan a la Tierra e interactúan con los átomos de la atmósfera. En estas interacciones se generan y destruyen partículas, a medida que estos núcleos van atravesando la atmósfera. Se produce una lluvia de aire extensa (o *extensive air shower, EAS*) que es una lluvia de diferentes partículas que van atravesando la atmósfera terrestre hasta que llegan a la superficie. Estas lluvias a medida que se acercan a la superficie terrestre empiezan a estar compuestas por una mayor cantidad de partículas pero de cada vez menos energía cada una individualmente. Cuando estos frentes de onda llegan a la superficie lo que se busca es medir estas partículas, aunque no todas se pueden medir por los mismos medios.

Observatorio Pierre Auger

Para estudiar estos rayos cósmicos, hace más de 20 años se creó el Observatorio Pierre Auger [1], una colaboración de 18 países y más de 500 científicos que se encuentra en Malargüe, Mendoza. El sistema de adquisición denominado *de superficie* del Observatorio cuenta con 1.600 detectores y una extensión de más 3000 km^2 . Su objetivo es estudiar los rayos cósmicos de alta energía por encima de 10^{17} eV hasta $\approx 10^{21}$ eV. Se busca, entre otras cosas, estudiar de qué están compuestas las partículas primarias que inician las *EAS* (si son protones o núcleos más pesados), dónde se producen estas partículas y también cuales son los mecanismos que las aceleran.

Auger Muon and Infill for the Ground Array (AMIGA)

El proyecto AMIGA [2] Se desarrolló como extensión al Observatorio con el objetivo de reducir el umbral de detección a energías de $10^{16.5}$ eV y de medir directamente el contenido muónico de lluvias de partículas inducidas por los rayos cósmicos. A tal fin, hubo que incluir en el Observatorio un nuevo sistema de detectores para medir exclusivamente los muones que son partículas muy poco interactuantes. Este detector se llama UMD o *underground muon detector*, que consta de 196 barras centelladoras (que cubren un área de 30 m^2) enterradas a 2.3 metros de profundidad en un sub-conjunto de detectores de superficie (detectores de efecto Cherenkov en agua) del Observatorio. Las barras se entierran dado que los muones son las únicas partículas que tienen capacidad de penetrar hasta esa profundidad, lo que permite eliminar posibles interferencias en la medición generadas por el resto de las partículas de las *EAS*.

Al impactar el muón con la barra centelladora excita a una serie de dopantes que están dentro de la red cristalina de la barra y éstos, al volver a su estado fundamental, emiten fotones. Estos fotones luego son absorbidos por las fibras ópticas que atraviesan cada una de las barras centelladoras y luego son re-emitidos en su interior. Así estos fotones son transportados a la electrónica del experimento. Esta electrónica está compuesta por unos foto-multiplicadores de Silicio (o SiPM, por sus siglas en inglés) y luego un circuito integrado llamado Citroc 1A compuesto de 32 canales diferentes, dentro de los cuales hay un Pre-Amplificador de Alta Ganancia, un FastShaper y finalmente un Discriminador. En términos generales, el SiPM convierte los fotones en una señal de voltaje y luego los distintos elementos del integrado Citroc 1A amplifican y filtran esta señal (la electrónica será explicada en más detalle en la siguiente sección). El discriminador se coloca con un umbral, o *threshold*, adecuado con el objetivo de disminuir

la mayor cantidad de ruido del detector sin perder señales de muones. La señal discriminada luego llega a un FPGA (o *Field Programable Gate Array*) que, con una frecuencia de muestreo de 320 MHz (equivalente a 3,125 ns), construye una señal binaria de ceros y unos donde los unos representan los valores de voltaje del discriminador positivos. El ancho de esta señal binaria de unos es proporcional a la cantidad de energía depositada por los muones que llegan a la barra centelladora. Se puede ver en la Figura 1.1 todas las etapas de las señales a medida que avanzan en los distintos elementos de la electrónica recién descritos.

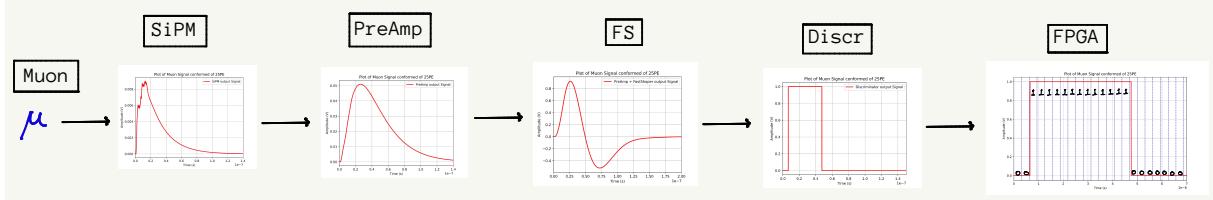


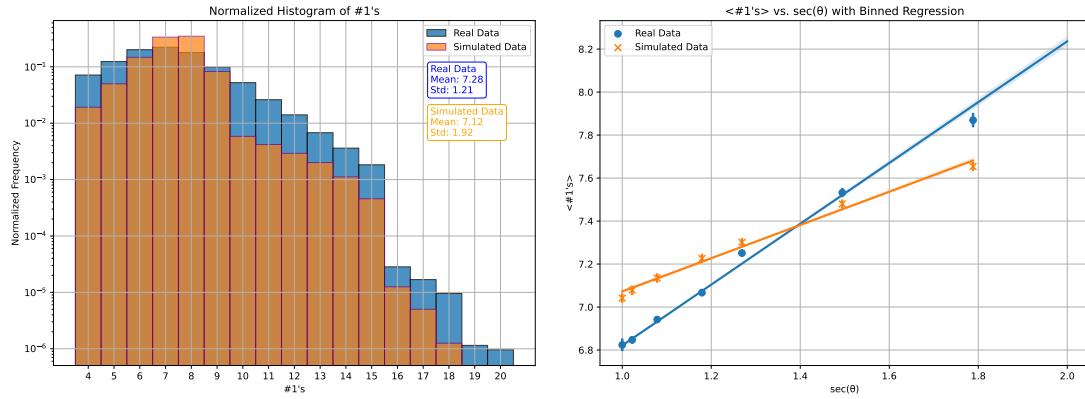
Figura 1.1: Imagen representativa del proceso que se observa cuando llega un muon al UMD, su transformación en una señal de voltaje con los SiPM, que luego se filtra y amplifica a partir de la electrónica y finalmente la generación de una señal binaria a partir del output del discriminador.

Motivación y Objetivos

La motivación de este trabajo es la existencia de diferencias entre los histogramas de frecuencia de cantidad de unos (señales binarias que representan la energía depositada por la llegada de muones) entre los datos experimentales medidos en el campo y las simulaciones hechas con el código oficial de la colaboración. Esto se puede ver en la Figura 1.2a, donde se observan dos comportamientos relevantes. En primer lugar se observa que tanto para los datos del campo (de color azul), como para los datos simulados (de color naranja) hay una caída grande a la aparición de señales de más de 15 unos. Esto se corresponde en ambos casos, pero hay una diferencia en frecuencias significativas. Sin embargo la principal diferencia es que en los datos simulados se observa una caída en la frecuencia de aparición de unos a partir de 10 unos. Al analizar si esta diferencia es debido al error estadístico de las simulaciones y los datos, se hace el cociente entre estos valores y se propagan los errores (que en este caso los errores estadísticos son igual a $\frac{1}{\sqrt{N}}$ donde N es el numero de entradas). Estos saltos no se pueden explicar por este motivo salvo que se considere que son causados por un comportamiento anómalo de la electrónica en las simulaciones. Esto fue motivó de análisis y se llegó a otro problema que muestra más visiblemente las diferencias. Como se ve en la Figura 1.2b cuándo se analizan cómo varían los valores medios de la cantidad de unos en función del ángulo con el que inciden los muones sobre la barra centelladora (definido por la $\sec(\theta)$) se ve que las pendientes de las lineales que ajustan esos puntos son diferentes. Cabe destacar que las diferencias son más notorias cuando se comparan los muones que llegan más inclinados y más verticales.

Este será el objeto de estudio de este proyecto. Es importante destacar que este problema es relativamente nuevo dado que los valores medios y las desviaciones estándar de las distribuciones de cantidad de #1's son muy similares entre las simulaciones y los datos experimentales siendo los valores medios de de 7,12 y 7,28 respectivamente, con desviaciones estándar de 1,92 y 1,21 respectivamente.

El objetivo de esta mitad del proyecto es intentar rehacer de cero, y con un código independiente, las simulaciones y lograr reproducir los resultados ya realizados con el código oficial de la colaboración, poniéndole énfasis en recuperar la caída abrupta de dos ordenes de magnitud de 15 a 16 unos y la caída en 10 unos. La propuesta es que, una vez realizado este punto, luego se pueda buscar cuáles podrían ser los problemas o inconsistencias de la simulación respecto a los



(a) Histogramas de frecuencia de unos comparando los datos del campo y los de la simulación de la colaboración.

(b) Valor medio de la cantidad de unos en función del ángulo de incidencia de los muones con datos del campo y simulados con el código oficial. Se observa que los datos simulados difieren de los datos del campo y que las mayores diferencias se encuentran en los bins correspondientes a los muones que llegan más verticales y más inclinados.

Figura 1.2: Motivación del trabajo. Se observan las diferencias en los histogramas de las distribuciones de unos para los datos simulados y los datos del campo, como también, las diferencias en la relación entre el valor medio de la cantidad de unos con el ángulo incidente.

datos del campo y luego solucionarlos. Para esto se estudiará en profundidad la forma en la que funciona la electrónica del UMD, se trabajará sobre la creación de pulsos de fotones individuales (*single photo-electrons o SPE*) y el modelado de pulsos de muones.

2. Desarrollo experimental

Para el desarrollo del análisis y estudio de la electrónica se utilizó casi exclusivamente el programa LTSpice para la simulación de la misma. Este programa permite recrear circuitos y analizar su respuesta en frecuencia como también su respuesta a diferentes pulsos de voltaje. Incluso el programa permite que uno le de como input a los circuitos un pulso simulado por un programa como Python, en formato de *.txt*, lo que será muy útil al momento de analizar la respuesta de la electrónica a partir de pulsos de muones simulados. El proceso de aprendizaje de la utilización de este programa fue una parte fundamental y necesaria de este proyecto y le fueron dedicadas las primeras semanas de trabajo.

2.1. Fotomultiplicadores de Silicio o SiPM

El primer elemento de la electrónica que atraviesan los fotones generados por la interacción de los muones con las barras centelladoras son los Fotomultiplicadores de Silicio o SiPM. Hay 64 SiPM en la electrónica de cada UMD, uno por cada una de las barras centelladoras. Estos tienen la función de convertir estos fotones en una señal de voltaje (puede ser más simple si se piensa como un flujo de electrones, es decir una corriente, atravesando una resistencia fija, por lo que se habla de una señal de voltaje).

Los SiPM están conformados por más de 1500 celdas de APD (*avalanche photo-diode*), que permiten la creación de señales de voltaje a partir de fotones. Así los SiPM, por la cantidad de celdas APD que poseen, tienen la característica de que pueden responder a la llegada de fotones de manera individual. Dado que los APD responden de manera uniforme a la llegada

de un fotón, se observa que los SiPM producen como output de la llegada de fotones, mesetas de diferentes valores voltajes bien definidos. Así cualquier fotón absorbido desencadena una avalancha, produciendo un pulso de salida estándar, en gran medida independiente del voltaje exacto, siempre que supere el umbral de ruptura. Lo que permite este comportamiento de los SiPM's es que cada una de estas mesetas se corresponde a número discreto y definido de fotones detectados (llamados foto-equivalentes o PE).

Todo este comportamiento se puede entender más claramente observando la Figura 2.1. Este gráfico se realizó usando los llamados *dark-rate pulses*, que son las señales que le llegan al SiPM si esta conectado a las barras centelladoras, pero aislado de muones. Es decir, que estas son las señales de fotones que llegan por la generación espontáneamente de estos por agitación térmica del material.

En esta Figura se grafica la frecuencia de aparición de diferentes valores de voltaje generados por los SiPM. Se puede ver que para rangos de voltajes bien definidos, por ejemplo entre 191 y 209 DAC counts donde se encuentra el primer plateau, la frecuencia de aparición de esos voltajes es aproximadamente igual. Esto se corresponde con la llegada de 1 fotón, con lo cual, estos rangos de voltajes se interpretan como los valores de voltaje generados por un foto-electrón. El límite de este voltaje se define como hasta donde las frecuencias de aparición dejan de ser iguales y se observa un cambio abrupto.

Este análisis fue tomado de la tesis doctoral de Botti de 2019 [3], la cual fue usada como guía, referencia y comparación, dado que fue ella quien desarrolló el código oficial con el que se hicieron las simulaciones. En la Figura 2.1 se puede ver la respuesta uniforme que tiene el SiPM para el primer y segundo foto-equivalente. Más adelante se buscará reproducir este fenómeno usando la electrónica simulada y recuperar los datos aquí descriptos. Este análisis será muy importante al momento de determinar el threshold del discriminador, valor que deberá ser puesto de manera tal que se disminuya lo mayor posible el ruido de las mediciones sin perder señales de muones.

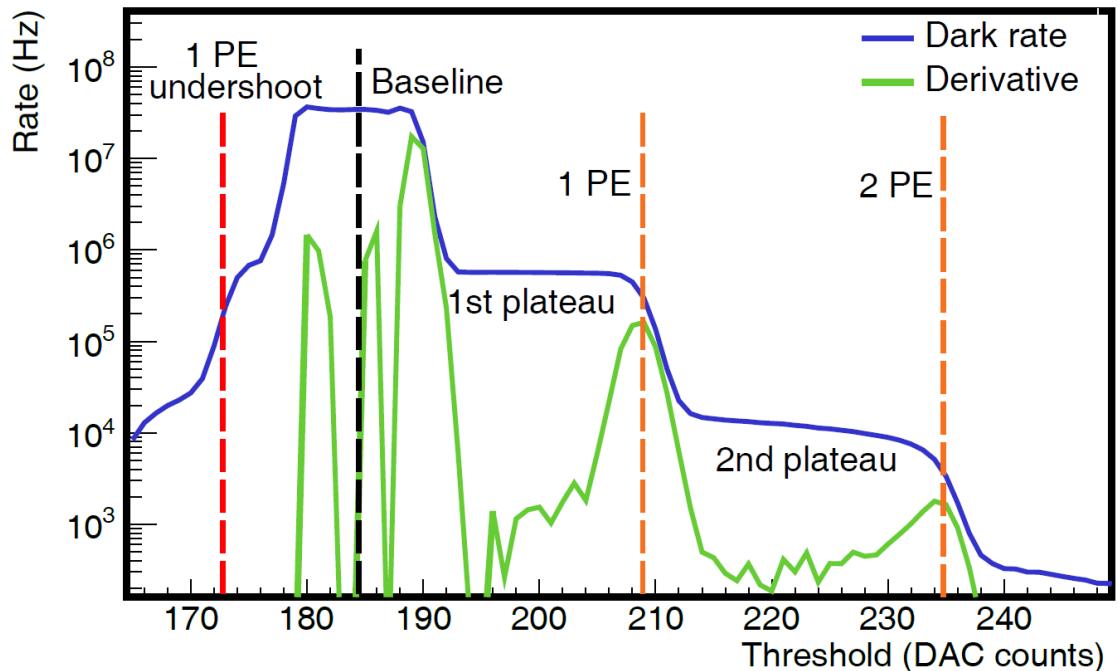
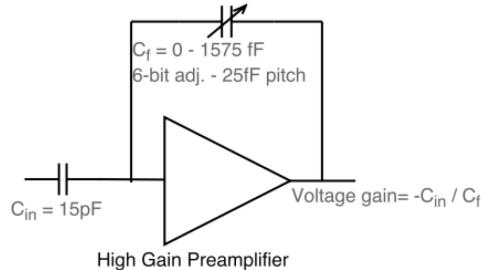


Figura 2.1: Gráfico de frecuencia de aparición de diferentes valores de voltajes medidos en DAC counts, producidos por los SiPM's frente a la llegada de fotones. Se observa la respuesta uniforme en rangos de voltajes bien definidos que tienen los SiPM. Se observa también a la izquierda de la linea negra denotada *baseline* el efecto generado por el *undershoot* del Fast-Shaper, elemento de la electrónica del integrado Citroc 1A.

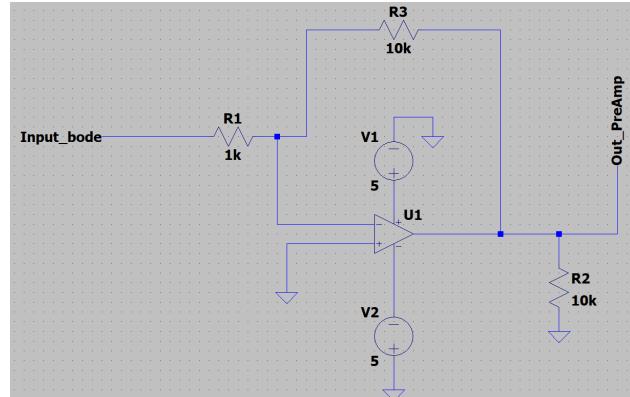
2.2. PreAmplificador

Luego de que los SiPM transformen los fotones generados por el muon en una señal de voltaje, el primer elemento del integrado Citiroc 1A que atraviesan estas señales es el PreAmplificador de Alta Ganancia. Para esta parte del estudio y modelado de las diferentes partes de la electrónica del integrado, se usó el datasheet del fabricante [4]. Es necesario recalcar que lo que provee el fabricante son modelos cualitativos de los diferentes circuitos de los componentes y por esto los valores exactos de las resistencias, capacitores, etc pueden variar. Lo que si es conocido de manera cuantitativa es la respuesta en frecuencia de los diferentes elementos utilizados en la electrónica que nos provee a su vez el fabricante.

El PreAmplificador funciona como un amplificador inversor que filtra y amplifica la señal de entrada. El modelado de este elemento de la electrónica es relevante detallar dado que hay una diferencia sustancial entre como fue simulado siguiendo el código oficial de la colaboración y cómo el fabricante describe a este mismo elemento. Se puede ver en la Figura 2.2a la descripción del PreAmplificador según el datasheet donde se puede ver que se modela usando capacitores en el loop de feedback. Esto es una diferencia relevante frente a la Figura 2.2b, que es el modelo que se uso en este trabajo para hacer la simulaciones tomando como referencia el código oficial. Aquí, a diferencia con lo que fue descripto por el fabricante, se observa que se usaron resistencias en el loop de feedback.



(a) Modelo del PreAmplificador del fabricante usando capacitores.



(b) Modelo del PreAmplificador simulado en LTSpice usando resistencias.

Figura 2.2: Descripciones del PreAmplificador de Alta Ganancia con los modelos del fabricante y los simulados para que se correspondan con el código oficial de la colaboración. Se observan diferencias en el modelado dado que en la Figura 2.2a se usan capacitores y en la Figura 2.2b se usan resistencias.

Hablando específicamente del la Figura 2.2b se puede ver cómo es el modelado del amplificador operacional, que es el elemento triangular llamado U_1 que se observa en el circuito. Este es alimentado con dos fuentes de manera que tiene una diferencia de voltaje de $\pm 5V$ y se usa en el modo inversor, es decir, que la señal de input entra por la entrada negativa. Este elemento del circuito es el responsable por la amplificación de la señales que tiene como input el PreAmplificador de Alta Ganancia. Este elemento también tiene otros factores que se pueden modificar en el LTSpice el *Gain Bandwidth Product* o *GBWP* o producto de ganancia de ancho de banda. Esto es una factor de mérito calculado multiplicando el ancho de banda del amplificador y la ganancia a la que se mide el ancho de banda. Este fue un factor con se fue modificando para que las simulaciones fueran correctas y fue seteado a 10^8 . Cabe destacar que analizando las simulaciones y observando su respuesta en frecuencias, se concluyó que al usar este elemento en las simulaciones del LTSpice se comporta como un componente capacitivo con lo cual afecta la respuesta en frecuencias de este circuito. En la sección de Resultados y Análisis se describirá cómo se comporta este circuito haciendo su análisis en frecuencias y cuales son las diferencias

que aparecen por las diferencias del modelado.

2.3. FastShaper

La señal de output del PreAmplificador de Alta Ganancia luego atraviesa otro circuito dentro del integrado Citiroc 1A llamado FastShaper. Este es un *practical differentiator* [5] y se comporta como un filtro pasabanda que a su vez amplifica la señal. A diferencia de la situación con el PreAmplificador donde el modelado difería cuando comparábamos con los datos del fabricante, aquí los modelos usados en el código oficial de la colaboración coinciden con los del fabricante en el diseño. Es por esto que en la Figura 2.3 no se observan diferencias en la estructura de los circuitos, aunque hay algunas diferencias en los valores de los capacitores $C1$ y $C2$. Se vuelve a alimentar al amplificador operacional $U1$, funcionand nuevamente de manera inversora, con dos fuentes de voltaje produciendo una diferencia de ± 5 . El único valor variable que no se observa en la Figura 2.3b es el GBWP del amplificador operacional el cual fue seteado a 8×10^8 .

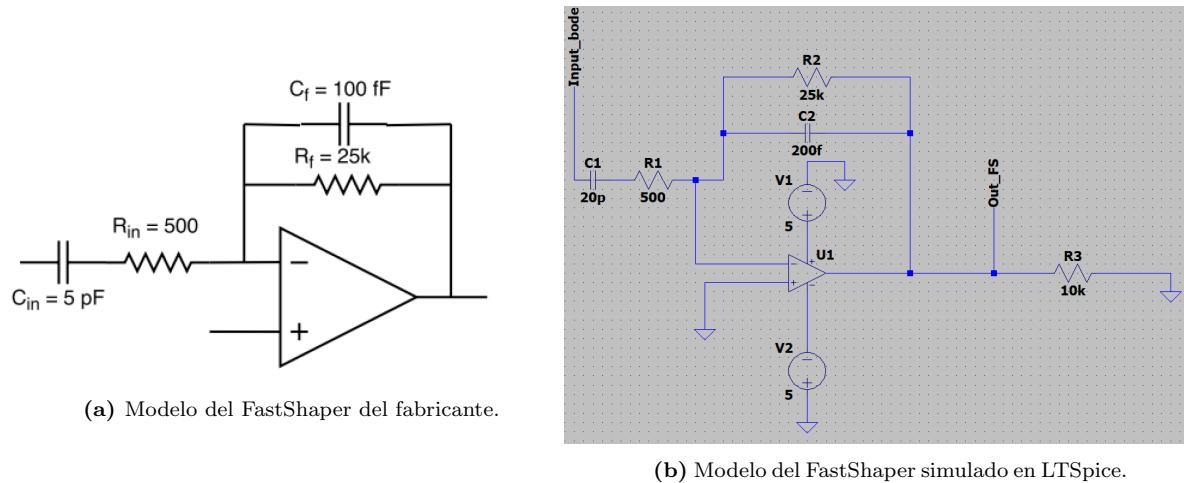


Figura 2.3: Descripciones del FastShaper con los modelos del fabricante y los simulados para que se correspondan con el código oficial de la colaboración. Se observan diferencias en el modelado dado que en la Figura 2.2a se usan capacitores y en la Figura 2.2b se usan resistencias.

Este circuito tiene muchos elementos capacitivos y por eso tendrá un gran efecto en la respuesta en frecuencia del mismo. Esto será analizado más adelante en la sección de Resultados y Discusiones, pero ya se puede observar a simple vista que este circuito tiene un RC en la entrada lo que será una de las principales causantes del *undershoot* que se describirá más adelante.

3. Resultados y Discusión

En esta sección de Resultados y Discusión se trabajó sobre la respuesta en frecuencia de cada uno de los componentes de la electrónica. Es importante destacar que este análisis fue de la mano con el ajustado de los parámetros de los componentes en los distintos circuitos simulados y la respuesta en frecuencia fue uno de los criterios principales para corroborar que las simulaciones de la electrónica fuesen correctas. Esto se pudo realizar de esta manera dado que se tenían los diagramas de Bode para comparar de tanto el fabricante como de las simulaciones del código oficial.

3.1. Respuesta en Frecuencia del PreAmplificador

Se realizó el análisis de la respuesta en frecuencias del PreAmplificador de Alta Ganancia usando el programa LTSpice. Como ya se discutió anteriormente, el PreAmplificador funciona como un amplificador inversor pero también tiene un efecto sobre la respuesta espectral de las señales. Tanto las simulaciones de esta parte del trabajo como las del código oficial, se modela al circuito como un filtro pasabajos. La forma de determinar si la simulación que se realizó en este trabajo concordaba con la del código de colaboración es analizar si las frecuencias de corte eran similares. La frecuencia de corte se define como la frecuencia en la que la atenuación cae 3dB respecto a la frecuencia máxima. En la tesis de Botti, que fue la base del código oficial de la colaboración, se planteaba una frecuencia de corte de aproximadamente 10MHz y se puede observar en 3.1a. En la simulación que pueden ver en la Figura 3.1b, la frecuencia de corte es de $(9.1 \pm 0.1) \times 10^6$ Hz. Esta concordancia de valores es la que permite concluir que el modelado de este circuito se corresponde con el del código oficial.

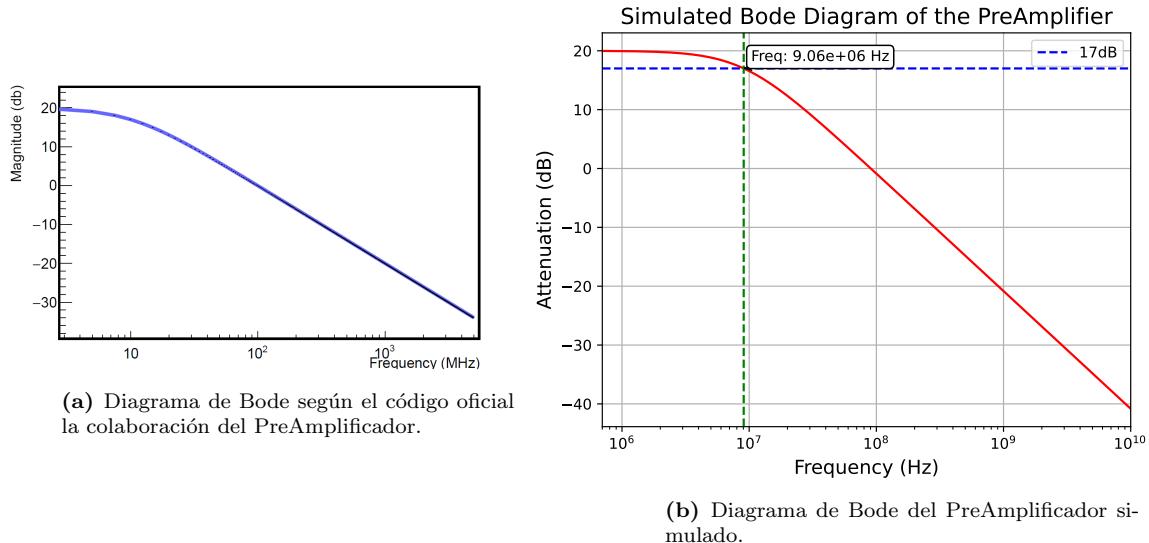


Figura 3.1: Diagramas de Bode del PreAmplificador de Alta Ganancia obtenidos del código oficial de la colaboración y simulados con la electrónica descripta anteriormente. Se observan que las frecuencias de corte son muy similares partiendo de 20dB.

En la simulación se mantuvo el valor de ganancia nominal que marcaba la tesis de Botti de $\times 10$ (esto se puede observar en las relaciones entre las resistencias en la Figura 2.2) y se encontró que colocando en el amplificador operacional un GBWP de 10^8 las simulaciones se ajustaban mejor. La amplificación real del circuito simulado fue de $\times 10$ y esto se analizó haciendo pasar una señal sinusoidal con alguna de las frecuencias que no eran atenuadas y viendo cuánto era la amplificación pico de la señal.

Cabe hacer una aclaración respecto a los diagramas de Bode del fabricante. La respuesta en frecuencia que indica difiere del código de la colaboración y por consiguiente con la simulación. El fabricante modela al PreAmplificador como un filtro pasabanda con una banda de frecuencias muy ancha. Esto se puede ver en la Figura 3.2. Esta diferencia es solo relevante para frecuencias bajas, dado que para las frecuencias altas se comporta igual que el circuito simulado.

Esto es una fuente de error de las simulaciones, pero dado que el objetivo era recuperar los datos del código oficial se mantuvo con esta diferencia. Esto se verá trabajado y arreglado en la próxima parte del proyecto. Sin embargo, se concluyó también que esto no es la fuente principal de error que genera la discrepancia en la distribución de #1's.

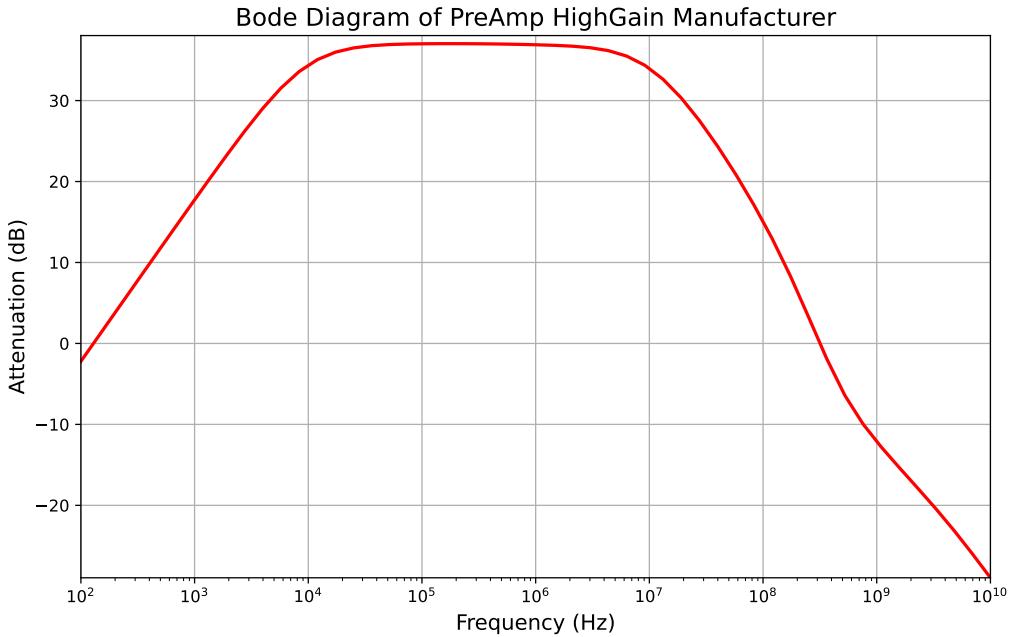


Figura 3.2: Diagrama de Bode del fabricante donde se ve que el PreAmplificador de Alta Ganancia es modelado como un filtro pasabanda.

3.2. Respuesta en Frecuencia del FastShaper

Se realizó el análisis de la respuesta en frecuencias del FastShaper usando el programa LTSpice. Como ya se discutió anteriormente, el FastShaper funciona como un *practical differentiator* con un gran efecto en el filtrado y la deformación de la señal. Aquí también se trabajo sobre las simulaciones para que la respuesta del FastShaper fuera la de un filtro pasabanda con una frecuencia pico de ≈ 10 MHz como en el código de la colaboración. El código oficial, que se puede observar en 3.3a, planteaba una frecuencia pico de aproximadamente 10 MHz y en la simulación que pueden ver en la Figura 3.3b, la frecuencia pico es de $(12,9 \pm 0,1) \times 10^6$ Hz.

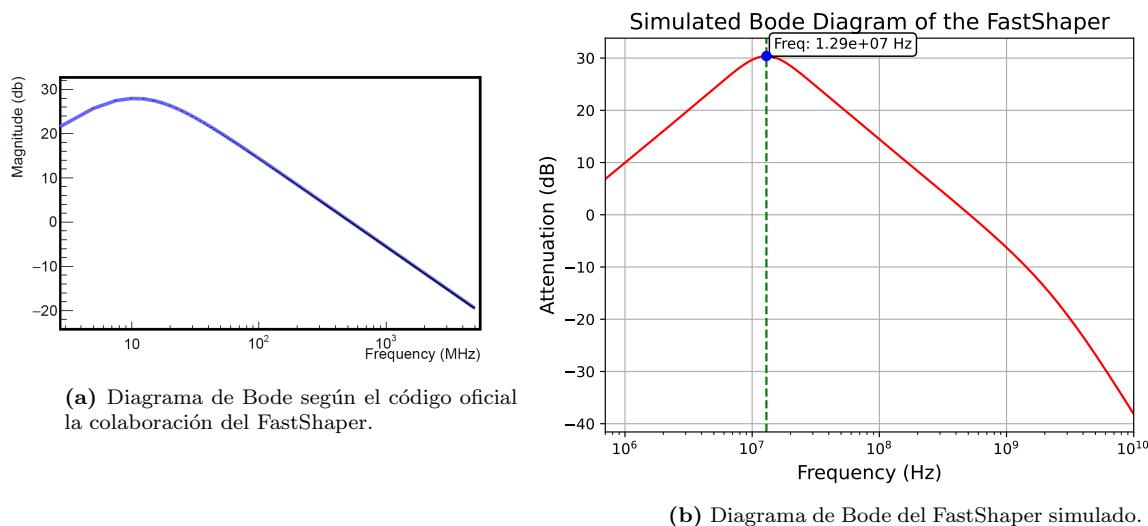


Figura 3.3: Diagramas de Bode del FastShaper obtenidos del código oficial de la colaboración y simulados con la electrónica descripta anteriormente. Se observan que las frecuencias pico son muy similares con una atenuación de aproximadamente 30dB.

A diferencia de con el PreAmplificador, aquí no hay una diferencia sustancial entre la respuesta en frecuencia simulada y del código oficial comparada con la que se obtuvo del fabricante. Se puede ver en la Figura 3.4, la diferencia entre la simulada y la del fabricante es que el pico de frecuencias se corre hacia los ≈ 30 MHz. Esta discrepancia se puede resolver volviendo a la Figura 2.3 y colocando los valores obtenidos del fabricante en los capacitores $C1$ y $C2$.

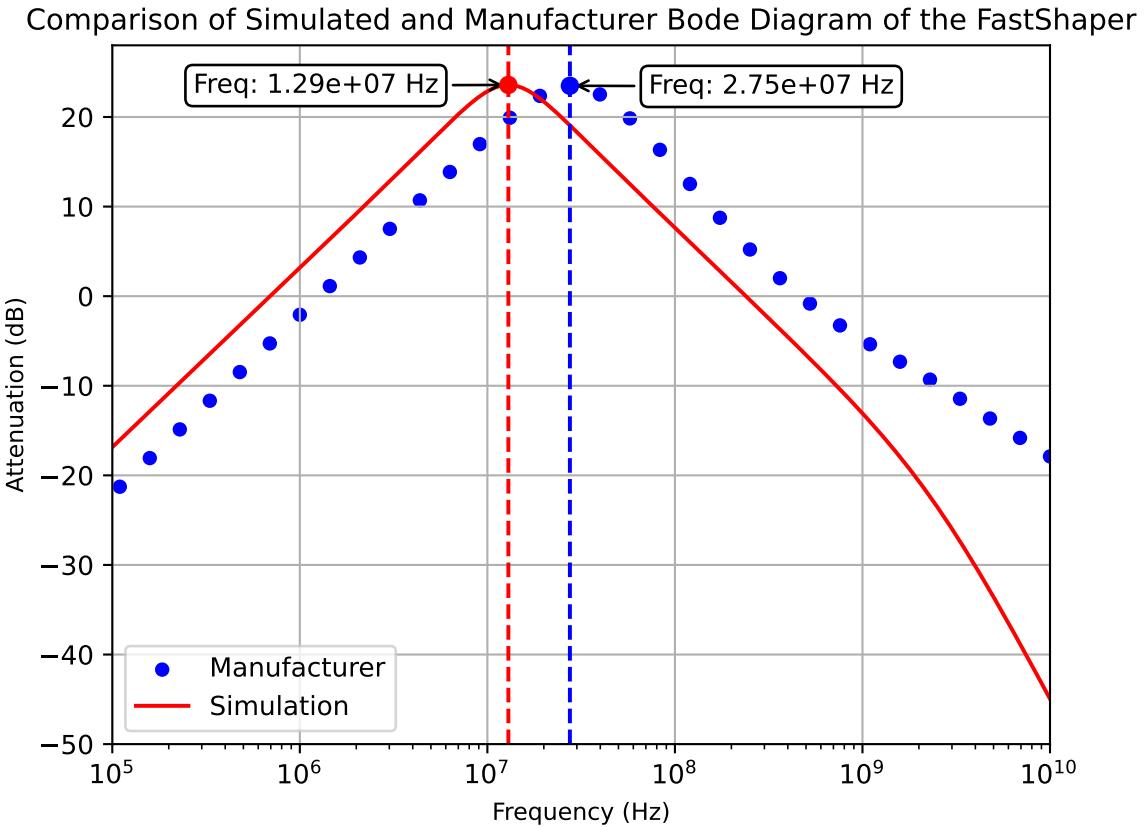


Figura 3.4: Comparación de los diagramas de Bode del fabricante y simulados con atenuaciones normalizadas al máximo del fabricante. Se observa la diferencia en el pico de frecuencia pero que la forma es análoga.

Aquí se normalizó la atenuación máxima del diagrama de Bode de la simulación al máximo del fabricante. Esta diferencia en la magnitud de la atenuación dependen del valor con el cual se alimentan las fuentes en las simulaciones y por ende no es relevante. En las simulaciones, en pos de mantenerlas consistentes, siempre se alimentó con una fuente de 1V y aquí se debió restar 6,8dB a todos los valores de las simulaciones para normalizarlos al máximo del fabricante. Estas diferencias no son relevantes para el análisis dado que lo importante es la forma de la curva, pero se realizó esta modificación al gráfico para que se observe más claramente que las formas funcionales son similares.

En la simulación se mantuvo el valor de ganancia nominal que marcaba la tesis de Botti de $\times 50$ (esto se puede observar en las relaciones entre las resistencias en la Figura 2.2) y se buscó que el factor de ganancia real fuera igual al descripto en la tesis de $\times 18$. La amplificación real del circuito simulado fue de $\times 31$ y esto se analizó haciendo pasar una señal sinusoidal con la frecuencias pico de 12,9 MHz y viendo cuanto era la amplificación de la señal. Esta diferencia es significativa pero dado que la respuesta en frecuencia del circuito es muy similar a la del código oficial y que el circuito luego deberá ser modificado para recuperar los datos del fabricante en la próxima etapa del proyecto, se tomo a este modelado del circuito como válido.

3.3. Respuesta en Frecuencia de la cadena entera - Mediciones Directas

Es relevante también analizar la respuesta en frecuencia de todo el circuito dado que se tiene también el diagrama de Bode del fabricante de toda la cadena de la electrónica. En la Figura 3.5 se pueden ver superpuestas las respuesta en frecuencia del fabricante en azul y en rojo la simulada. Se puede ver que en ambos casos, la cadena se comporta como un filtro pasabanda, con frecuencias pico de $\approx 19,1 \times 10^6$ Hz y $(10,2 \pm 0,1) \times 10^6$ Hz respectivamente. En este gráfico también se normalizo la atenuación máxima de las simulaciones al máximo de la del fabricante, teniendo que sumar 6,5dB a la señal simulada. Se puede observar que la forma de la curva es extremadamente similar, a menos de que el pico de frecuencias esté corrido hacia las frecuencias más altas.

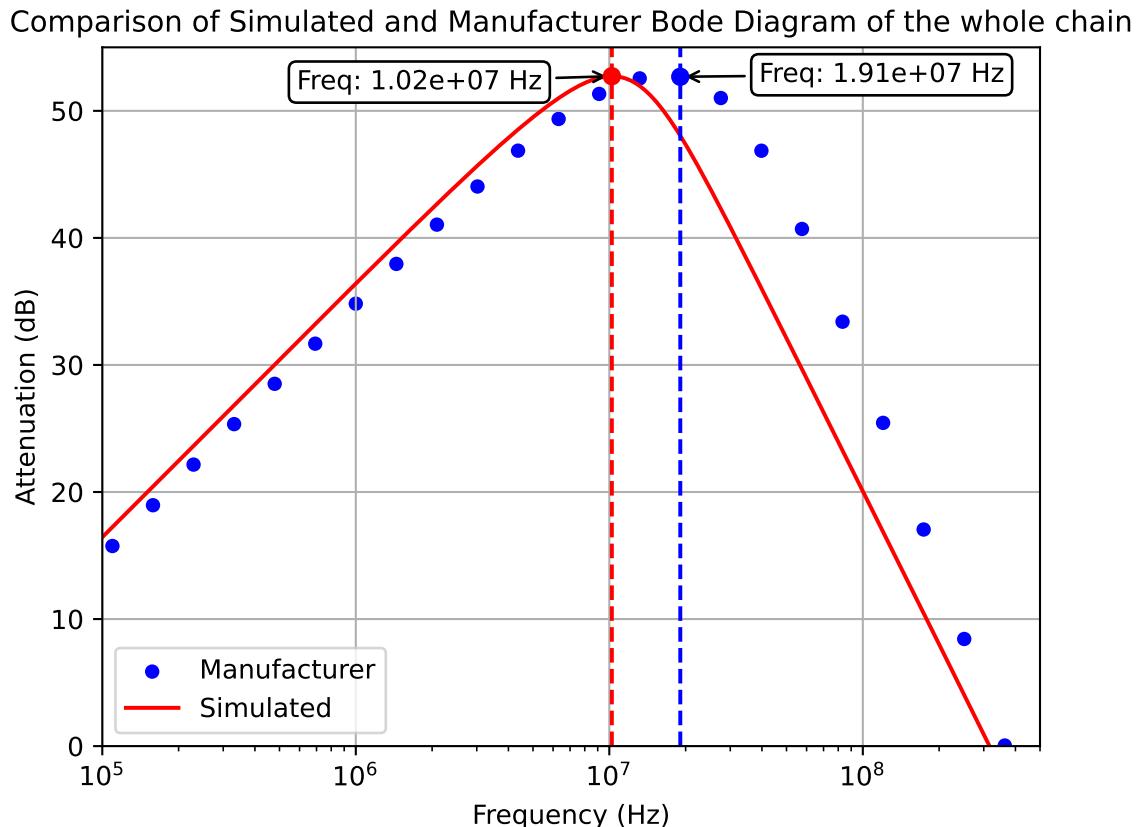


Figura 3.5: Comparación de los diagramas de Bode de toda la cadena de la electrónica del fabricante y simulados con atenuaciones normalizadas al máximo del fabricante. Se observa la diferencia en el pico de frecuencia pero que la forma funcional es análoga.

También es relevante remarcar este análisis realizado dado que para el final de esta parte del proyecto, se pudo empezar a hacer una medición directa de la electrónica como se puede ver en la Figura .1 en el Anexo. Se utilizaron pines de medición que tiene el mismo circuito integrado Citiroc 1A para realizar el diagrama de Bode de toda la cadena. No se entrará en mayor detalle en los resultados de estas mediciones dado que se realizaron a ultimo momento y no fueron calibradas, pero de manera cualitativa se muestra en la Figura 3.6 la comparación de la respuesta en frecuencia de las señales medidas, las simuladas y las del fabricante.

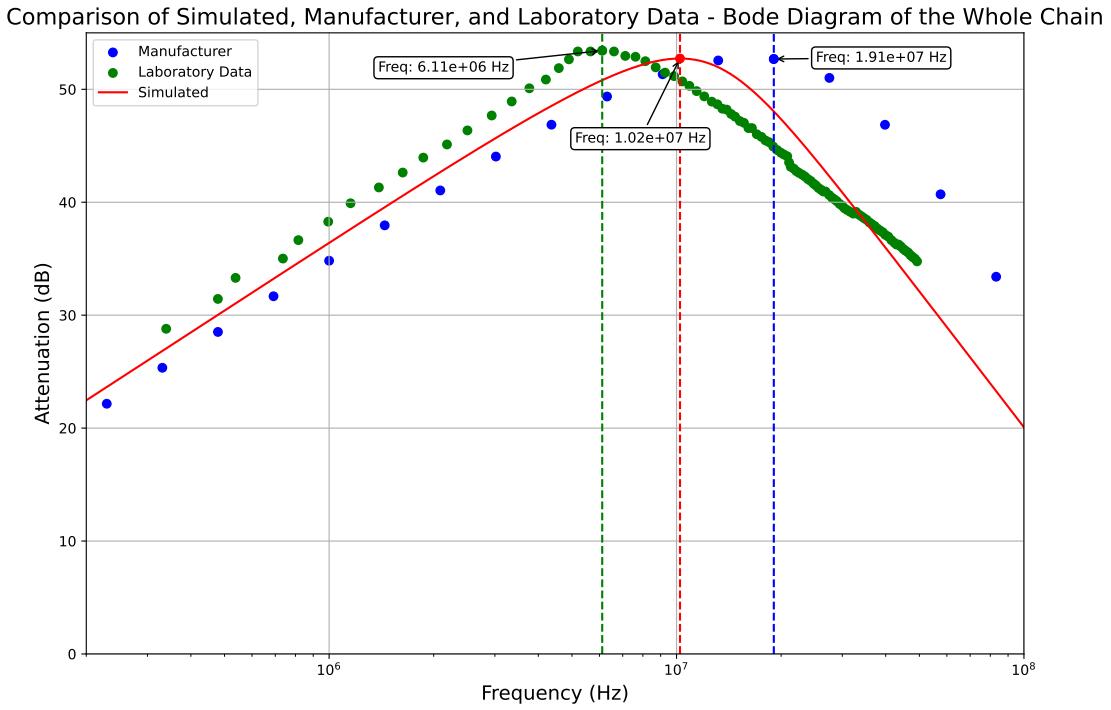


Figura 3.6: Comparación de los diagramas de Bode realizados con la medición directa de la electrónica, las simulaciones y los datos del fabricante con atenuaciones normalizadas. Se observa una forma funcional similar en todas.

3.4. Pulsos de Fotones (SPE) y de Muones

Para poder recuperar la señal binaria con las simulaciones, se debe hacer pasar la señal de salida del FastShaper por un Discriminador. Este debió tener su threshold puesto de manera adecuada para que se correspondiera con el experimental usado en el campo. El mismo es de 2.5PE y se colocó en este lugar para eliminar lo más posible las señales del ruido térmico sin perder señales de muones. Cabe destacar que aparte de este criterio, se utilizó otro que solo clasifica a una señal como producida por muones si contiene más de tres unos consecutivos.

Para poder simular el discriminador con el threshold adecuado se debió primero, lograr simular la señal de un foto-equivalente. Esta parte del trabajo se realizó usando Python y se modeló usando una función de exponenciales decrecientes obtenida a partir del código oficial de la colaboración:

$$f(t) = A_1 \left(1 - e^{-t/\tau_r}\right) \left(A_2 e^{-t/\tau_{f1}} + A_3 e^{-t/\tau_{f2}} + e^{-t/\tau_{f3}}\right) \quad (3.1)$$

Los valores de estas constantes fueron calculados y están declarados en el trabajo de Botti con sus valores medios y sus desviaciones estándar respectivas. El código que se usó para generar estos *single photo-electrons o SPE* se encuentra en el Anexo. Vale la pena destacar que cada SPE mantiene la variabilidad dada por las desviaciones estándar, sampleando de una distribución normal correspondiente, cada vez que se genera un SPE.

Una vez generados los SPE's se puede pasar a describir como es una señal de Muones, conformadas de muchos fotones, luego de impactar contra la barra centelladora. Aquí es relevante entender la física del experimento. Como se describió en la introducción hay dos procesos que se

suceden al llegar un muon, que son el decaimiento radioactivo de los dopantes para emitir los fotones y el mismo proceso luego de que las fibras ópticas absorben estos fotones y los re-emiten en su interior. Al ser estos procesos probabilísticos, los fotones no llegan al SiPM todos al mismo tiempo, sino que hay un offset temporal en la llegada de los mismos. Para la simulación de señales de muones conformada de muchos SPE's, esto debe ser tomado en cuenta y se debe modificar el código respecto al generador de SPE de manera que se considere esto. Esto también se puede ver en el Anexo, y se modela con dos exponenciales decrecientes. Los tiempos característicos de estos decaimientos radioactivos fueron tomados del código oficial de la colaboración de 3,5ns y 3,7 ns respectivamente, pero son valores que no fueron medidos explícitamente y fueron puesto de manera cualitativa. Esto será motivo de discusión y trabajo en la siguiente parte del proyecto.

3.5. Threshold del Discriminador - Curvas de *dark-rate pulses* simuladas

Una vez que ya se pudo simular las señales de los foto-equivalentes, se modelo el discriminador, que no es más que una llave conectada a una fuente de tensión tal que se abre si el voltaje es superior al threshold y genera una señal cuadrada. La manera de calcular el valor de voltaje de dicho threshold, sabiendo que el criterio es que este colocado a los 2,5PE, es hacer pasar por toda la electrónica las señales de 1, 2 y 3PE respectivamente y ver su respuesta. Para entrar un poco más en detalle de esto, hay que entender que no es tan simple como buscar el voltaje máximo del pico de la señal del n-foto-equivalente a la salida de la electrónica. Esto se debe a que solo se produce en la señal binaria un valor de uno cuando un FPGA (*field programmable gate array*) con una frecuencia de muestreo de 320 MHz (o 3,125 ns) mide que el voltaje de la señal cuadrada del discriminador es mayor a cero.

Con lo cual, lo que se realizó es calcular el pico de las señales de los diferentes foto-equivalentes a la salida de la electrónica, considerando que el ancho de la señal debía ser como mínimo igual a 3,125ns. Con esto se determinaron los valores de voltaje de cada uno de los foto-equivalentes y se pudo calcular que el threshold de 2,5PE es de 91,6mV.

A partir de esto, se puede reproducir la Figura 2.1, que es la curva de *dark-rate* utilizando los valores de frecuencia relativo que aparecen allí y usando como función modelo la tangente hiperbólica. Esto se puede ver en la Figura 3.7.

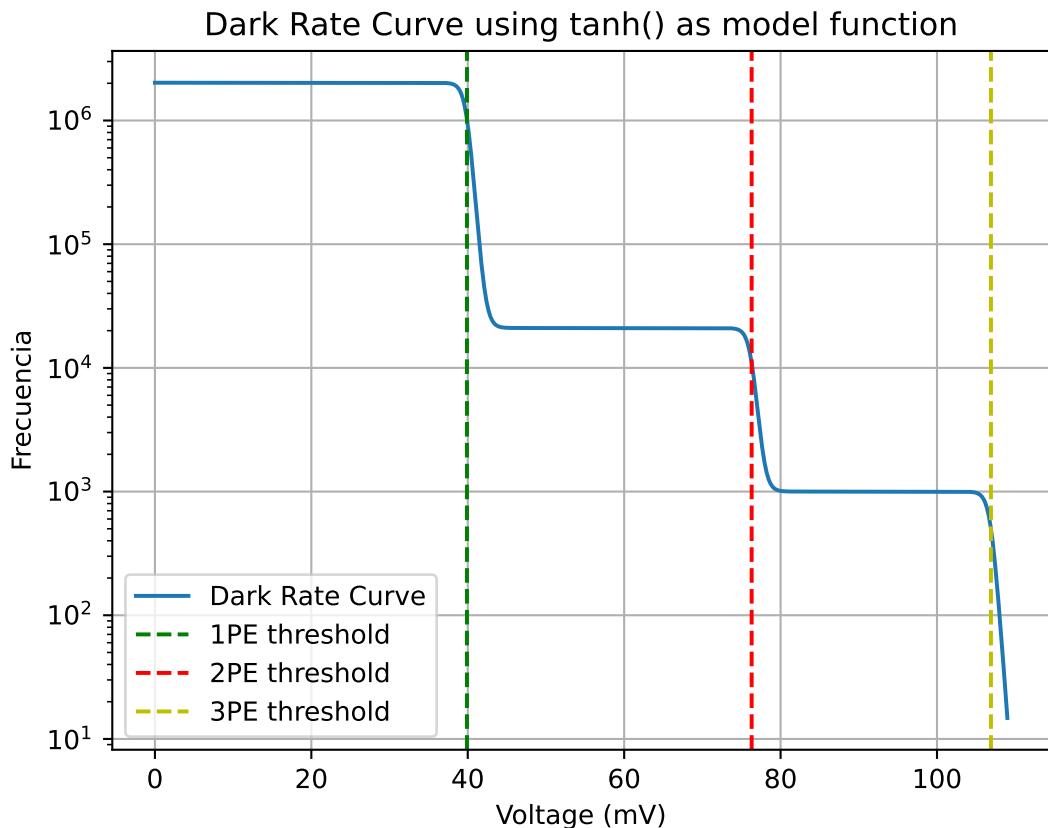


Figura 3.7: Curva de *dark-rate* usando las frecuencias relativas, usando los valores de la tesis de Botti, y tangentes hiperbólicas como funciones modelo.

3.6. Respuesta de la electrónica frente los pulsos de muones

Ahora que ya se lograron modelar señales de muones y el discriminador fue colocado con el threshold apropiado se puede presentar como es la señal de salida de la electrónica. En la Figura 3.8 se pueden ver como la señal de los muones se va filtrando y amplificando a medida que atraviesa la electrónica.

Se multiplicó por 100 la señal de input de muones, compuesta por 25PE's, para que se observara bien en la escala del output del FastShaper. Se observa que la señal de PreAmplificador no deforma considerablemente la señal, pero la alarga levemente y amplifica. Esta señal también fue multiplicada por 15 y luego por -1 dado que el PreAmp funciona como un amplificador inversor. Finalmente se observa la señal del FastShaper con su comportamiento característico de *undershoot*, con la señal correspondiente del discriminador, cuando la señal del FastShaper es mayor al threshold.

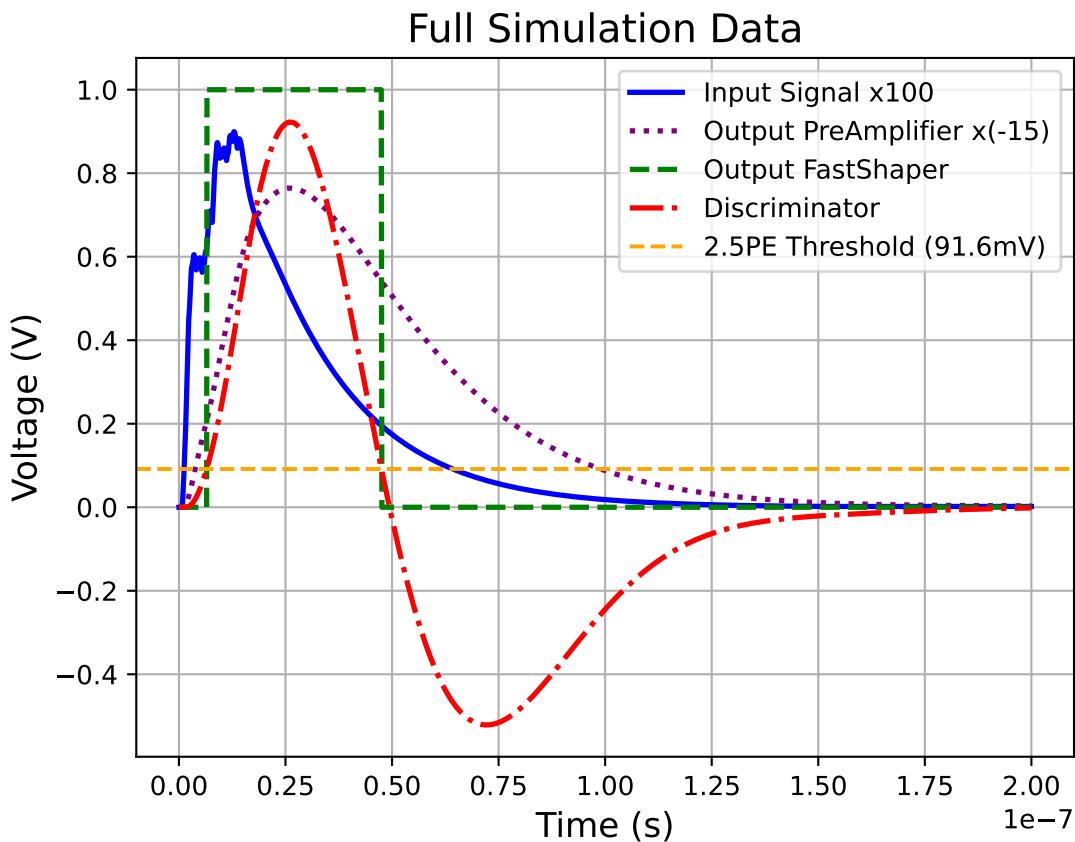


Figura 3.8: Simulación de una señal de muones de 25PE's atravesando toda la electrónica. Se observa como cada componente va filtrando y amplificando las señales. Finalmente se observa la señal cuadrada del discriminador.

3.7. Distribución de #1's obtenida de las simulaciones

Se logró reproducir el comportamiento esperado de la electrónica frente a la llegada de una señal de muones. Esto permitió hacer el análisis de la distribución de unos generando muchas señales de muones compuestas de muchos SPE's. Para esto se uso una medición ya realizada de cómo es la distribución de foto-equivalentes en función de en que lugar de la barra impactan los fotones. Se sampleo de una distribución poissoniana usando los valores medios que se obtiene de esta distribución para la simulación de los pulsos de muones (esto se puede ver en el Anexo). Se hizo atravesar estas señales por toda la electrónica y se calculó la cantidad de unos correspondiente a cada señal. Se ve en la Figura 3.9 el histograma de la distribución de #1's obtenido de estas simulaciones.

Se observa que se recupera la forma que esperábamos de la distribución de unos donde se observa que una caída abrupta en la distribución de unos luego de los 14 unos apuntando hacia los 15. La razón por la que no se observa un bin de pocas entradas en 15 unos es por la poca estadística de las simulaciones (10^4 pulsos) contra los datos presentados en la motivación (más de 10^6 pulsos).

Sin embargo, se encontraron ciertos problemas. No se observa, por ejemplo, que las poblaciones de pocos unos (por ejemplo 4, 5 o 6) sean más grandes, cuando sí lo son tanto en los datos del campo como en la simulación del código oficial. Además se observa que el crecimiento de la cantidad de unos recién comienza a estabilizarse en los 11 unos, frente a los 8 unos en los datos del campo. Por otro lado, los valores medios fueron un poco mayores a lo esperado, siendo de

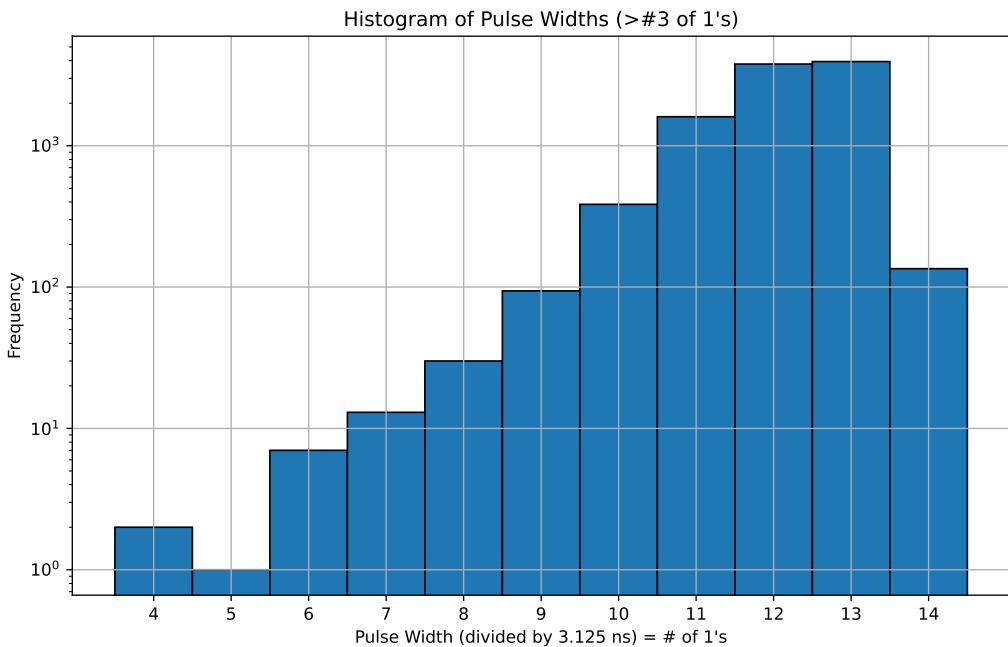


Figura 3.9: Histograma de frecuencia de aparición de unos simulado a partir de las señales de muones y la electrónica descripta. Se observa que se recupera la caída abrupta en la cola de la distribución.

12,13 con una desviación estándar de 0,98. De todas formas, dado que el objetivo de esta parte del proyecto era realizar las simulaciones de la electrónica y hacer un primer intento en subsanar las discrepancias entre las simulaciones del código oficial y los datos del laboratorio, se concluyó que fueron validas las simulaciones realizadas, considerando sus mejoras posibles a realizar. También se concluyó que la distribución de unos muestra un comportamiento compatible con el esperado.

Se adjudican estos problemas al modelado del FastShaper, dado que hubo cierto indicios de que el comportamiento de este homogeneizaba demasiado las señales, siendo solo sensible a las subidas de las mismas; a las discrepancias en la simulaciones del PreAmplificador por no usar capacitores; y posiblemente a que los tiempos característicos de los decaimientos radioactivos de los cuales se samplea el offset temporal de los SPE's en los pulsos de muones, deban ser modificados.

4. Conclusiones

Se logró simular la electrónica del integrado Citiroc 1A usado en AMIGA, de acuerdo al código oficial de la colaboración. El PreAmplificador de Alta Ganancia se modelo de manera casi idéntica al del código oficial como un amplificador inversor, pero con diferencias importantes en el diseño (modelado con capacitores) y función (planteado como filtro pasa-banda en lugar de pasa-bajo) con respecto a los datos del fabricante. Se modeló con una frecuencia de corte de $(9,1 \pm 0,1) \times 10^6$ Hz que se concordó con la descripta por la colaboración.

Para el FastShaper las diferencias fueron menores entre el código oficial, los datos del fabricante y lo simulado. Se simuló como un *practical differentiator* que actúa como un filtro pasabanda con una frecuencia pico de $(12,9 \pm 0,1) \times 10^6$ Hz similar a la del código oficial. La principal diferencia con los datos del fabricante fue que la frecuencia pico estaba corrido hacia

los $\approx 30\text{MHz}$.

Finalmente se comparó la respuesta en frecuencia de toda la cadena de integrado Citiroc 1A entre lo simulado y los datos del fabricante. Esta medición fue especialmente importante dado que se empezaron a realizar mediciones directas de la respuesta en frecuencia del integrado lo cual permitió tener un camino más de análisis, aunque esta medición de laboratorio no fue calibrada todavía. Este análisis fue el más concluyente de que, aun con diferencias, el modelado de la electrónica es razonable dado que se comporta como lo esperado, como un filtro pasa-banda, con una frecuencia pico de $(10,2 \pm 0,1) \times 10^6 \text{ Hz}$.

Se trabajó sobre el modelado de los pulso de foto-equivalentes individuales, que a su vez combinando muchos de ellos, conformaban una señal de muones. Aquí se presto especial énfasis al offset temporal de la llegada de cada uno de los SPE's producto de la física probabilística del experimento. Con esto se describió el comportamiento del discriminador, calculando la curva de *dark-rate* y obteniendo el valor en voltaje del threshold del discriminador colocado en 2,5PE, tal que dicho voltaje era 91,6mV.

Finalmente se analizó el comportamiento de las señales de muones simuladas al atravesar cada uno de los componentes de la electrónica y cómo se iban amplificando y deformando las señales. Aquí se trabajó usando con énfasis la medición del valor medio de PE's en función de la posición de la barra donde llegan los muones. Con esto se reprodujo la distribución de #1's que motivo esta parte del trabajo con una forma compatible a la esperada y con valores medios y desviaciones estándar que se encontraron un poco alejados de los esperados.

Se describieron en profundidad las caracterizaciones que se hicieron de la electrónica y cuales fueron sus discrepancias con los datos obtenidos del fabricante. También se dieron una serie de posibles causas de las discrepancia entre las distribuciones de #1's simuladas y las esperadas. Esto será uno de los puntos en los que se trabajará en la siguiente parte del proyecto en pos de recuperar un histograma de frecuencia de #1's similar al del campo. Por otro, se describió como también deben ser analizados, en busca de hacer bien las simulaciones, los valores de los tiempos característicos de los decaimientos radioactivos de los cuales se samplea el offset temporal para los distintos SPE's que conforman un pulso de muones.

Referencias

- [1] Dariusz Gora (for the Pierre Auger Collaboration). «The Pierre Auger Observatory: review of latest results and perspectives». En: *Special Issue Selected Papers from the 7th International Conference on New Frontiers in Physics* (2018).
- [2] Antonella Castellina (for the Pierre Auger Collaboration). «AugerPrime: the Pierre Auger Observatory Upgrade». En: *EPJ Web of Conferences* (2019).
- [3] Ana Martina Botti. «Determination of the chemical composition of cosmic rays in the energy region of 5 EeV with AMIGA upgrade of the Pierre Auger Observatory». Tesis doct. UNSAM y KIT, 2019.
- [4] Weeroc Developers. *Citiroc 1A Datasheet: Version 2.53*. Accessed: 18-04-2024. 2019. URL: <https://www.weeroc.com/products/sipm-read-out/citiroc-1a>.
- [5] Basic Electronic Tutorials. *Practical Differentiator*. Accessed: 12-07-2024. URL: <https://www.electronics-tutorial.net/analog-integrated-circuits/opampdifferentiator/practical-differentiator/>.

Anexo

Experimental para la medición directa de la electrónica

Imagen del experimental usado para la medición directa de la electrónica usando los pines de medición propios del Citiroc 1A.

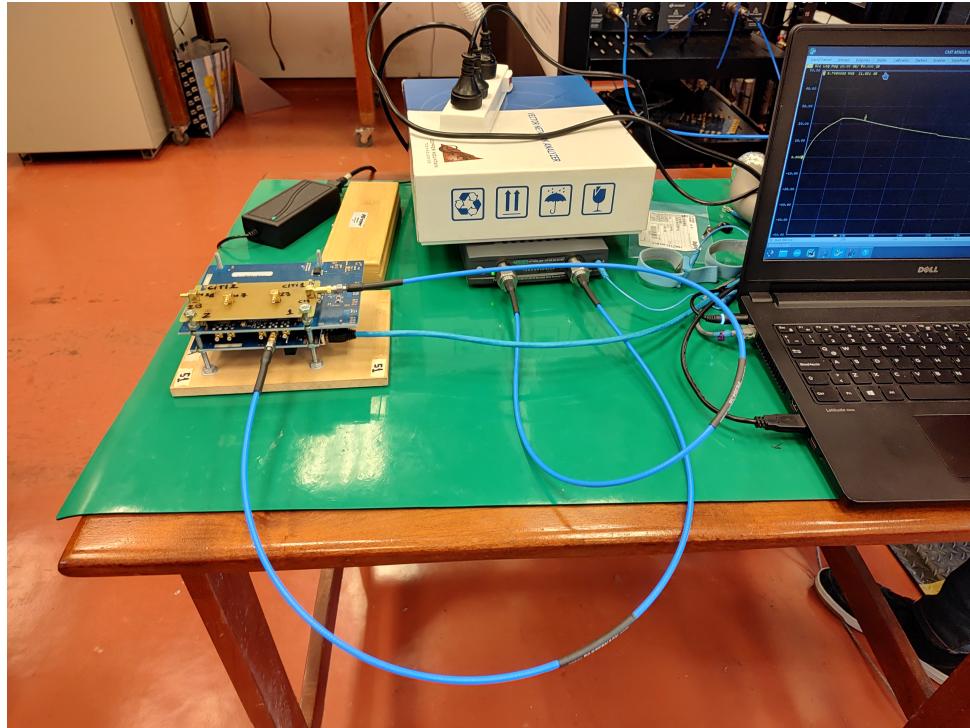


Figura .1: Experimental para la medición directa de la electrónica.

Código generador de los SPE's

```
1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 from scipy.stats import norm
4 import os
5
6 def f(t, A1=0.3, A2=23.8, A3=1.59, tau1=3.9, tau2=1.13, tau3=22.20, tau4=0.251):
7     """Computes the value of the function f(t) that represents a photon with
8     given parameters, only for t >= 0."""
9     t = np.maximum(t, 0) # Ensures that there are no negative time offsets
10    term1 = A1 * (1 - np.exp(-t / tau1))
11    term2 = A2 * np.exp(-t / tau2)
12    term3 = A3 * np.exp(-t / tau3)
13    term4 = np.exp(-t / tau4)
14    return term1 * (term2 + term3 + term4)
15
16 def simulate_photon_data_photoequivalent(n_photons):
17     t_values = np.linspace(0, 100, 1500)
18     summed_values = np.zeros_like(t_values)
19
20     # Parameters sampled from normal distributions
21     A1 = norm.rvs(loc=0.3, scale=0.01) # Mean = 0.3mV, SD = 0.01mV
22     A2 = norm.rvs(loc=23.8, scale=0.2) # Mean = 23.8, SD = 0.2 (Sin unidades)
23     A3 = norm.rvs(loc=1.59, scale=0.01) # Mean = 1.59, SD = 0.01 (Sin unidades)
```

```

23 tau1 = norm.rvs(loc=3.9, scale=0.2) # Mean = 3.9ns, SD = 0.2ns
24 tau2 = norm.rvs(loc=1.13, scale=0.02) # Mean = 1.13ns, SD = 0.02ns
25 tau3 = norm.rvs(loc=22.20, scale=0.4) # Mean = 22.20ns, SD = 0.4ns
26 tau4 = norm.rvs(loc=0.251, scale=0.005) # Mean = 0.251ns, SD = 0.005ns
27 data = n_photons*f(t_values, A1, A2, A3, tau1, tau2, tau3, tau4)/1000
28
29 # Aca hago que las unidades se correspondan con los valores esperados
30 t_values = t_values*(10**(-9))
31
32 plt.figure(figsize=(10, 6))
33 # Plot the resulting function
34 plt.plot(t_values, data, color='red', label='Output Signal', linewidth=2)
35 plt.title(f'Plot of {n_photons} Individual Photons and Output Signal of
Summed Photons')
36 plt.xlabel('Time (s)')
37 plt.ylabel('Amplitude (V)')
38 plt.grid(True)
39 plt.legend()
40 plt.show()
41
42 # Export the data after showing the plot
43 export_data_photoequivalent(t_values, data, n_photons)

```

Listing 1: Generador de SPE

Código generador de pulsos de Muones - Offset temporal

```

1 # Define the function
2 def func_distance(x, A, lambda1, lambda2):
3     """Computes the value of the function f(t) that represents a photon with
given parameters, only for t >= 0."""
4     term1 = A * np.exp(-x/lambda1)
5     term2 = (1 - A) * np.exp(-x/lambda2)
6     return term1 + term2
7
8 def func_signal(t, A1=0.3, A2=23.8, A3=1.59, tau1=3.9, tau2=1.13, tau3=22.20,
tau4=0.251):
9     """Computes the value of the function f(t) that represents a photon with
given parameters, only for t >= 0."""
10    t = np.maximum(t, 0) # Ensures that there are no negative time offsets
11    term1 = A1 * (1 - np.exp(-t / tau1))
12    term2 = A2 * np.exp(-t / tau2)
13    term3 = A3 * np.exp(-t / tau3)
14    term4 = np.exp(-t / tau4)
15    return term1 * (term2 + term3 + term4)
16
17 def generate_offsets(n, scale):
18     """Generate n random offsets using an exponential distribution with a given
rate."""
19     return np.random.exponential(scale=scale, size=n)
20
21 def generate_custom_offsets(n, tau1=3.5, tau2=3.7):
22     """Generate n random offsets using the custom distribution combining two
exponential distributions."""
23     scale1 = tau1
24     scale2 = tau2
25
26     offsets1 = generate_offsets(n, scale1)
27     offsets2 = generate_offsets(n, scale2)
28
29     combined_offsets = (offsets1 + offsets2)
30     return combined_offsets

```

```

31
32 def concatenate_and_export_photon_signals(x_values, times, time_gap_ns=500):
33     all_t_values = []
34     all_summed_values = []
35     current_time = 0
36
37     # Sample parameters for the Poisson process using func_distance
38     A = norm.rvs(loc=42.8, scale=1.8)
39     lambda1 = norm.rvs(loc=3.78, scale=0.25)
40     lambda2 = norm.rvs(loc=0.035, scale=0.001)
41
42     y_values = func_distance(x_values, A, lambda1, lambda2)
43
44     # Generate Poisson samples for each x_value, times times
45     poisson_samples = poisson.rvs(mu=np.abs(y_values)[:, np.newaxis], size=(len(
46         x_values), times))
47
48     print("Poisson sampled points:", poisson_samples)
49
50     # Plot the curve and Poisson samples
51     plt.figure(figsize=(14, 8))
52     plt.plot(x_values, y_values, 'o-', label=f'func_distance with A={A:.2f}, 1
53     ={lambda1:.2f}, 2 ={lambda2:.2f}', color='black')
54
55     # Plotting each set of samples
56     for i in range(times):
57         plt.scatter(x_values, poisson_samples[:, i], label=f'Poisson sample set
58         {i+1}', zorder=5)
59
60     plt.title('Function Distance Plot with Poisson Samples')
61     plt.xlabel('Distance (m)')
62     plt.ylabel('PEs')
63     plt.grid(True)
64     plt.legend()
65     plt.show()
66
67     for index, n_samples in enumerate(poisson_samples):
68         for n in n_samples:
69             # Generate custom offsets for the signal
70             random_offsets = generate_custom_offsets(n)
71
72             # Generate time values and initialize summed values
73             t_values = np.linspace(0, 150, 3000)
74             summed_values = np.zeros_like(t_values)
75
76             # Sample parameters for func_signal
77             A1 = norm.rvs(loc=0.3, scale=0.01)
78             A2 = norm.rvs(loc=23.8, scale=0.2)
79             A3 = norm.rvs(loc=1.59, scale=0.01)
80             tau1 = norm.rvs(loc=3.9, scale=0.2)
81             tau2 = norm.rvs(loc=1.13, scale=0.02)
82             tau3 = norm.rvs(loc=22.20, scale=0.4)
83             tau4 = norm.rvs(loc=0.251, scale=0.005)
84
85             for offset in random_offsets:
86                 individual_values = func_signal(t_values - offset, A1, A2, A3,
87                 tau1, tau2, tau3, tau4)/1000
88                 summed_values += individual_values
89
90             t_values = t_values * (10 ** -9)
91
92             t_values += current_time

```

```

90     all_t_values.extend(t_values)
91     all_summed_values.extend(summed_values)
92     current_time = t_values[-1] + time_gap_ns * 1e-9 # Convert ns to s
93     for the time gap
94
95     # Save the concatenated data to a file
96     filename = f"combined_photon_data_{times}_times.txt"
97     with open(filename, 'w') as file:
98         for t, value in zip(all_t_values, all_summed_values):
99             file.write(f"{t}, {value}\n")
100
100 return all_t_values, all_summed_values, poisson_samples

```

Listing 2: Offset Temporal + nueva función de simulación