



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

---

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

---

Construcción y caracterización de una HVPS para RPCs

Tesis presentada al

**Colegio de Física**

como requisito parcial para la obtención del grado de

**LICENCIADO EN FÍSICA**

por

Jesús Enrique Armenta Lara

Asesorado por

Dra. Cecilia Uribe Estrada  
Dr. Guillermo Tejeda Muñoz

Puebla Pue.  
Mayo de 2025





Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

---

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

---

Construcción y caracterización de una HVPS para RPCs

Tesis presentada al

**Colegio de Física**

como requisito parcial para la obtención del grado de

**LICENCIADO EN FÍSICA**

por

Jesús Enrique Armenta Lara

Asesorado por

Dra. Cecilia Uribe Estrada  
Dr. Guillermo Tejeda Muñoz

Puebla Pue.  
Mayo de 2025



**Título:** Construcción y caracterización de una HVPS para RPCs  
**Estudiante:** JESÚS ENRIQUE ARMENTA LARA

COMITÉ

---

Dr. Arturo Fernández Téllez  
Presidente

---

M.C. Emigdio Jiménez Domínguez  
Secretario

---

Dr. Germán Ardul Muñoz Hernández  
Vocal

---

Dr. Mario Iván Martínez Hernández  
Vocal

---

Dra. Cecilia Uribe Estrada  
Asesora

---

Dr. Guillermo Tejeda Muñoz  
Coasesor



# Agradecimientos

Mamá, Papá:

Es difícil expresar con palabras cuánto significan para mí. Desde el primer día, han estado a mi lado, brindándome apoyo inquebrantable en cada paso de mi vida. Su amor incondicional y su constante ánimo han sido el motor que me impulsó a alcanzar este logro. Sin su guía, paciencia y apoyo, nada de lo que he logrado habría sido posible. Cada sacrificio que hicieron, cada palabra de aliento que me ofrecieron, ha sido fundamental en mi éxito. Les estoy eternamente agradecido por ser los pilares de mi vida.

Diana:

Tú has sido una fuente constante de inspiración y apoyo a lo largo de este viaje. Tu energía y bondad me han enseñado a ser un mejor hermano y una mejor persona cada día. Tu aliento y confianza en mí han sido un faro de luz en los momentos más oscuros. Siempre has estado ahí para celebrar mis triunfos y aliviarme en mis derrotas. Sin duda, eres una de las razones por las que he llegado hasta aquí.

Abu:

Tu amor y confianza siempre me han dado la fuerza necesaria para superar cualquier obstáculo en este camino. Tu fe y tu confianza en mí han sido un regalo invaluable, y cada vez que sentía dudas, recordaba tus palabras. Sé que siempre has estado orgullosa de mí, y eso me ha dado la determinación para poder continuar. Te agradezco profundamente todo lo que has hecho por mí y el amor que me has brindado a lo largo de mi vida.

Katy:

No puedo dejar de expresar lo mucho que ha significado tu presencia durante el tiempo que compartimos en la carrera. Tu constante apoyo y tu confianza en mis habilidades me motivaron a seguir adelante incluso cuando las cosas se volvían desafiantes. Estoy en deuda contigo por ser mi compañera, confidente, y amiga. Tu apoyo fue esencial en estos años, y siempre recordaré todos esos momentos en la carrera, cada examen, cada clase, cada conversación, y nuestro mutuo crecimiento. Gracias por estar a mi lado.

Mónica:

Nuestra amistad ha sido un pilar fundamental en mi vida. A lo largo de los años, tu apoyo incondicional y tus palabras siempre oportunas me han dado fuerzas cuando más las necesitaba. Tu amistad ha sido un regalo invaluable, y estoy agradecido por cada momento compartido. Eres una persona excepcional y quiero expresar mi sincera gratitud por ser una amiga tan increíble. De corazón, espero que esta amistad sea de toda la vida.

Al niño que soñaba con átomos y planetas:

Lo logramos, lo estamos haciendo. Gracias por soñar e imaginar tantas cosas, por ver hacia el infinito, por nunca rendirte, por ser siempre tú. Gracias por haber plantado la semilla de la curiosidad, que más adelante germinó, y ahora empieza a dar sus frutos. El espíritu nunca muere.

La educación pública y gratuita es un pilar fundamental de la sociedad, puesto que concede a la mayoría de la población el acceso a una formación técnica, humana, social, y científica que le permita aspirar a mejorar su calidad de vida. Por lo que agradezco al pueblo de México, que con su trabajo y contribuciones hacen posible la existencia de esta, y me ha permitido tener la formación académica con la que hoy cuento. Hago un exhorto a fortalecer la educación pública en el país, y no dejarla desaparecer.

Al movimiento estudiantil de ayer y de hoy, gracias.

Al Maestro Fermín Tenorio Cruz: Muchas gracias por todo. Su pasión por la ciencia, sus enseñanzas, y su legado vivirán siempre en el corazón de quienes fuimos sus alumnos.

Por último, pero no menos importante, a la Dra. Cecilia y a el Dr. Guillermo, Sin su guía, paciencia y experiencia, esta tesis habría sido una tarea imposible de llevar a cabo. Su compromiso con mi éxito académico y profesional ha sido evidente en cada paso del camino. Sus consejos, correcciones y dirección fueron esenciales para dar forma a este trabajo. Estoy profundamente agradecido por su mentoría y por brindarme la oportunidad de aprender de ustedes.

A todos ustedes, querida familia, amigos y amigas, y mentores, les agradezco desde lo más profundo de mi corazón. Cada uno de ustedes ha sido una pieza fundamental en este logro, y mi éxito es también el suyo. Gracias por su amor, apoyo y amistad inquebrantables.

# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>XI</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivo general . . . . .	2
1.2. Objetivos específicos . . . . .	2
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>3</b>
2.1. Fundamentos de electrónica . . . . .	3
2.1.1. Rectificación de voltaje . . . . .	3
2.1.2. Multiplicador de voltaje . . . . .	5
2.1.3. Voltaje de rizo . . . . .	6
2.1.4. Fuentes de voltaje . . . . .	6
2.1.5. Fuentes conmutadas . . . . .	7
2.1.6. Oscilador Royer . . . . .	7
2.2. Ionización . . . . .	8
2.3. Formación de avalanchas . . . . .	8
2.4. Carga Espacial . . . . .	9
2.5. RPCs . . . . .	10
2.5.1. RPCs de doble gap . . . . .	11
2.5.2. RPCs de vidrio . . . . .	12
2.6. Modos de Operación en las RPCs . . . . .	12
2.6.1. Modo Avalancha . . . . .	12
2.6.2. Modo Streamer . . . . .	13
<b>3. Desarrollo experimental</b>	<b>15</b>
3.0.1. Revisión de diseño . . . . .	15
3.0.2. Montaje de componentes iniciales . . . . .	16
3.0.3. Corrección de problemas de conexión . . . . .	16
3.0.4. Verificación del funcionamiento del oscilador Royer . . . . .	18
3.0.5. Construcción de divisores de voltaje para monitoreo . . . . .	20
<b>4. Resultados</b>	<b>23</b>
4.0.1. Caracterización de voltaje . . . . .	23
4.0.2. Descripción de los Datos . . . . .	30
4.0.3. Análisis Estadístico Inicial . . . . .	30
4.0.4. Resultados del Filtrado de Datos . . . . .	30
4.0.5. Desempeño de la RPC con la HVPS . . . . .	31
4.0.6. Comparación con otros resultados . . . . .	42
4.0.7. Análisis de estabilidad del voltaje de la HVPS . . . . .	46

<b>5. Conclusiones</b>	<b>49</b>
5.1. Síntesis de Resultados . . . . .	49
5.2. Propuestas para trabajos futuros . . . . .	49
<b>A. Esquemáticos de la fuente</b>	<b>51</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>57</b>

# Índice de figuras

2.1. Voltaje de corriente directa (a), y voltaje de corriente alterna (b) . . . . .	3
2.2. La corriente alterna que sale del transformador pasa a través del diodo. . . . .	4
2.3. El diodo deja pasar solo un ciclo de la corriente alterna, en este caso, el positivo. .	4
2.4. Salida del rectificador de media onda. . . . .	4
2.5. Puente rectificador de onda completa . . . . .	5
2.6. Circuito que multiplica el voltaje por un factor de 2 [8]. . . . .	5
2.7. Voltaje de rizo de una fuente de poder. . . . .	6
2.8. Un electrón libre (entrando por la izquierda) atraviesa un campo eléctrico lo su- ficientemente intenso para provocar colisiones elásticas e inelásticas con átomos y moléculas, resultando en la creación de nuevos electrones libres, además de átomos excitados o ionizados [1]. . . . .	9
2.9. Concepto visual de una avalancha, con las regiones donde el campo eléctrico es significativamente distinto al campo aplicado debido a los efectos de la carga especial[1].	10
2.10. El primer prototipo de un RPC consistía de dos contadores idénticos rígidos puestos uno encima de otro, con la misma lámina de cobre como tierra común [1]. . . . .	11
2.11. Esquema de la sección transversal de un RPC genérico de un solo gap [14]. . . . .	11
2.12. Esquema de una RPC de doble gap [1], notar que el voltaje se aplica de manera que los electrones producidos en ambos gaps se muevan en dirección de los strips. Bajo tales condiciones, ambas señales inducidas tienen la misma polaridad. . . . .	12
3.1. Diagrama del funcionamiento del prototipo de la HVPS. . . . .	15
3.2. Fotografía de la parte frontal de la placa de la HVPS, antes de la soldadura de los componentes. Las áreas destacadas corresponden a: naranja, potenciómetro y regulación de voltaje; verde, divisores de voltaje; amarillo, multiplicadores de voltaje; rosa, entrada de voltaje; y rojo, oscilador Royer. . . . .	16
3.3. Imagen del corte en la pista de la conexión del potenciómetro y los puentes soldados bajo el microscopio. . . . .	17
3.4. Placa de la HVPS, con los componentes iniciales ya soldados, del lado derecho se puede ver el puente. . . . .	18
3.5. Se puede ver ruido antes de encender la fuente, tras esto, el voltaje aumenta y comienza a estabilizarse. . . . .	18
3.6. Se puede notar la estabilidad en los ciclos del voltaje, aún cuando este sigue aumen- tando. . . . .	19
3.7. Detalle de las oscilaciones del voltaje. . . . .	19
3.8. Fotografía de la HVPS, antes de añadir el divisor de voltaje para monitoreo. . . . .	20
4.1. Fotografía del proceso de caracterización del voltaje. . . . .	23
4.2. Resultados de las mediciones de voltaje . . . . .	25
4.3. Gráfica de las 3 series de mediciones combinadas. . . . .	26
4.4. Mediciones superpuestas con su línea de tendencia. . . . .	27

4.5. Esquema del nuevo circuito propuesto para la regulación de voltaje entre 4V y 5V(Ver figura A.2 en anexos) . . . . .	28
4.6. Una de las primeras señales registradas por el osciloscopio. . . . .	29
4.7. Amplitud mínima promedio VS el voltaje suministrado por la HVPS. . . . .	31
4.8. Carga integrada promedio VS el voltaje suministrado por la HVPS . . . . .	32
4.9. Eventos VS Amplitud, 6440 V, Strip 1. . . . .	33
4.10. Eventos VS Amplitud, 6440 V, Strip 1 . . . . .	33
4.11. Eventos VS Amplitud, 7120 V, Strip 1. . . . .	34
4.12. Eventos VS Carga, 7120 V, Strip 1. . . . .	34
4.13. Eventos VS Amplitud, 7760 V, Strip 1. . . . .	35
4.14. Eventos VS Carga, 7760 V, Strip 1. . . . .	35
4.15. Eventos VS Amplitud, 8400 V, Strip 1. . . . .	36
4.16. Eventos VS Carga, 8400 V, Strip 1. . . . .	36
4.17. Eventos VS Amplitud, 8800 V, Strip 1. . . . .	37
4.18. Eventos VS Carga, 8800 V, Strip 1. . . . .	37
4.19. Eventos VS Amplitud, 6440 V, Strip 2. . . . .	38
4.20. Eventos VS Carga, 6440 V, Strip 2. . . . .	38
4.21. Eventos VS Amplitud, 7080 V, Strip 2. . . . .	39
4.22. Eventos VS Carga, 7080 V, Strip 2. . . . .	39
4.23. Eventos VS Amplitud, 7720 V, Strip 2. . . . .	40
4.24. Eventos VS Carga, 7720 V, Strip 2. . . . .	40
4.25. Eventos VS Amplitud, 8360 V, Strip 2. . . . .	41
4.26. Eventos VS Carga, 8360 V, Strip 2. . . . .	41
4.27. Eventos VS Amplitud, 8800 V, Strip 2. . . . .	42
4.28. Eventos VS Carga, 8800 V, Strip 2. . . . .	42
4.29. Número de eventos por amplitud. . . . .	43
4.30. Número de eventos por carga. . . . .	43
4.31. Señal típica producida por el paso de partículas cargadas. . . . .	44
4.32. En negro está indicada la señal producida en el RPC. . . . .	44
4.33. Señales combinadas del RPC. . . . .	45
4.34. Todas las señales de una medición combinadas. . . . .	45
4.35. Oscilograma con picos máximos de voltaje. . . . .	46
A.1. Entrada de voltaje y parte de la regulación. . . . .	52
A.2. Potenciómetro regulador de voltaje, y parte de la regulación . . . . .	53
A.3. Oscilador Royer . . . . .	54
A.4. Multiplicadores y divisores de voltaje . . . . .	55

# Resumen

La presente tesis se centra en la construcción y caracterización de una Fuente de Alimentación de Alto Voltaje (High Voltage Power Supply, HVPS) diseñada específicamente para su integración con Cámaras de Placas Resistivas (Resistive Plate Chambers, RPCs). La necesidad de una solución asequible y eficaz en el ámbito de la física de partículas motiva este trabajo. Se parte de un diseño existente, se identifican y corrigen posibles errores, y se busca optimizar la funcionalidad y estabilidad de la HVPS. Los objetivos incluyen la construcción del circuito, la medición de los voltajes de salida, la integración con una RPC y la realización de pruebas experimentales.



# Capítulo 1

## Introducción

La investigación y desarrollo en el campo de la física de partículas elementales demandan herramientas avanzadas y especializadas para la detección y estudio de partículas subatómicas. En este contexto, las fuentes de alimentación de alto voltaje (HVPS, por sus siglas en inglés) desempeñan un papel esencial al proporcionar la energía necesaria para el funcionamiento de detectores como las Cámaras de Placas Resistivas (RPCs, por sus siglas en inglés). Una HVPS se encarga de convertir y regular voltajes a niveles significativamente superiores, permitiendo así la operación eficiente de estos detectores cruciales en la investigación en física de partículas.

En esencia, una HVPS toma una entrada de voltaje relativamente bajo y la transforma en una salida de alto voltaje necesario para la operación de detectores de partículas. La capacidad de generar voltajes elevados de manera controlada es fundamental para garantizar la sensibilidad y eficiencia de los detectores utilizados en experimentos de partículas elementales.

La importancia de contar con una HVPS eficiente radica no solo en la viabilidad económica de los proyectos de investigación, sino también en la flexibilidad y adaptabilidad que ofrece a los laboratorios. La capacidad de diseñar y construir una HVPS propia abre la puerta a soluciones personalizadas, adaptadas a las necesidades específicas de cada experimento, superando así las limitaciones asociadas con las fuentes de alimentación comerciales, a menudo costosas.

En el marco de esta investigación, nos enfocamos en la construcción, caracterización y optimización de un prototipo de HVPS diseñada específicamente para su integración con las RPCs. Una vez conectada la HVPS a una RPC, se pondrá a funcionar, y se tomarán datos por medio de un osciloscopio para su posterior análisis.

Nuestro objetivo primordial es superar las restricciones económicas vinculadas a las soluciones comerciales, al mismo tiempo que enfrentamos los desafíos técnicos inherentes a la generación y regulación eficaz y precisa de voltajes elevados.

## 1.1. Objetivo general

El objetivo principal de este trabajo es construir una HVPS a partir de un diseño preexistente, ponerla en operación y, mediante mediciones experimentales y análisis de datos, caracterizar su desempeño para evaluar su correcto funcionamiento y eficacia.

## 1.2. Objetivos específicos

- Implementar la construcción de la High Voltage Power Supply (HVPS) conforme al diseño establecido.
- Realizar un análisis detallado del diseño construido, identificando y corrigiendo posibles errores para mejorar su funcionalidad y estabilidad.
- Medir y registrar los voltajes de salida de la HVPS en diversas condiciones operativas para evaluar su consistencia y estabilidad.
- Conectar la HVPS a una Resistive Plate Chamber (RPC) y realizar pruebas experimentales.
- Recopilar datos experimentales durante las pruebas para analizar el rendimiento conjunto de la HVPS y la RPC.
- Verificar el correcto funcionamiento del sistema y proponer mejoras si es necesario.

# Capítulo 2

## Marco Teórico

### 2.1. Fundamentos de electrónica

#### 2.1.1. Rectificación de voltaje

##### Rectificador de media onda

El voltaje constante es producido por una fuente de Corriente Directa (Direct Current, DC), y este es representado mediante una línea recta horizontal para mostrarlo como voltaje en función del tiempo, como se muestra en el diagrama de la figura 2.1a.

El voltaje instantáneo de DC varía rápidamente con respecto al tiempo en algunos sistemas que no usan baterías como alimentación. Esta situación surge, por ejemplo, cuando se corre una onda sinusoidal de voltaje a través de un circuito rectificador, que permite el flujo de corriente en una sola dirección. [7]

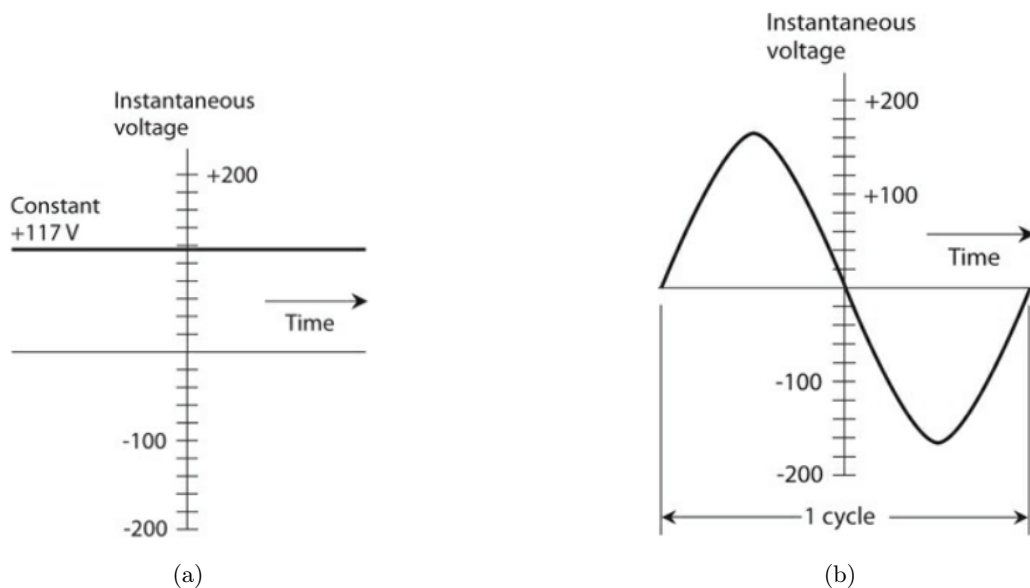


Figura 2.1: Voltaje de corriente directa (a), y voltaje de corriente alterna (b)

La propiedad de conducir la corriente en una sola dirección es una característica distintiva de los diodos; en el diagrama de la figura 2.2, hay una carga conectada al circuito. El camino de la corriente

durante los semi-ciclos positivos de Corriente Alterna (Alternating Current, AC)(Figura 2.1b) se muestra en el diagrama. La corriente fluye a través del diodo porque está hacia adelante. Como se muestra en la figura 2.3, el diodo “corta” la mitad del ciclo de AC, dejando pasar únicamente la otra mitad, en este caso, el semi-ciclo positivo [7].

La Figura 2.4 muestra la función de onda de la corriente, y a pesar de que el voltaje es intermitente, siempre es positivo, lo que significa que es equivalente a la corriente continua [3].

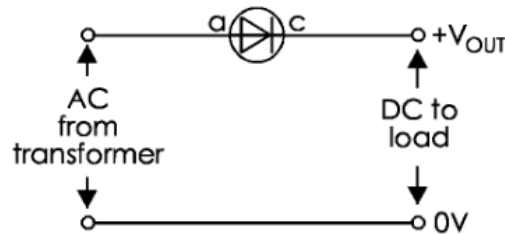


Figura 2.2: La corriente alterna que sale del transformador pasa a través del diodo.

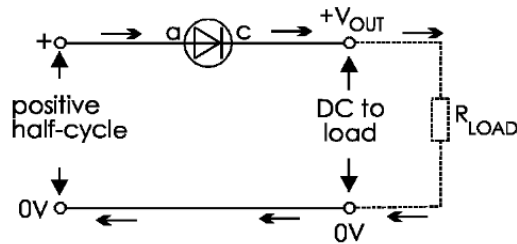


Figura 2.3: El diodo deja pasar solo un ciclo de la corriente alterna, en este caso, el positivo.



Figura 2.4: Salida del rectificador de media onda.

Un circuito que convierte AC en DC se llama rectificador, y dado que este rectificador produce corriente únicamente del semi-ciclo positivo, se le llama rectificador de media onda. Se puede hacer también un rectificador de media onda que deje pasar únicamente el semi-ciclo negativo.

### Rectificador de onda completa

A partir de ambas mitades del ciclo de AC, se puede construir un rectificador para cada mitad, y hacer un rectificador de onda completa haciendo un puente de cuatro diodos, tal como se ve en la figura 2.5 que aparece en [3].

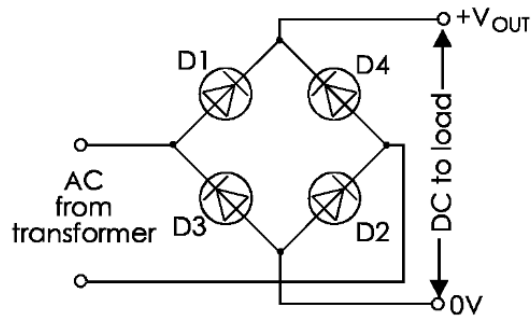


Figura 2.5: Puentes rectificadores de onda completa

Durante el semi-ciclo positivo, los diodos  $D1$  y  $D2$  están conectados con la polaridad hacia adelante, por lo que la corriente fluye a través de ellos. Los diodos  $D3$  y  $D4$  están conectados con la polaridad invertida, así que la corriente no pasa a través de ellos. Y durante el semi-ciclo negativo, los diodos  $D1$  y  $D2$  tienen la polaridad invertida y no conducen la corriente, mientras que los diodos  $D3$  y  $D4$  si. El resultado de esto es que la corriente puede fluir a través de este arreglo en una sola dirección durante ambos semi-ciclos, por lo que tiene una eficiencia del 100%. Este arreglo es el rectificador de onda completa [3].

### 2.1.2. Multiplicador de voltaje

El funcionamiento básico de un multiplicador de voltaje se basa en la acumulación progresiva de la carga eléctrica en una serie de capacitores, seguida de su liberación secuencial a través de una serie de diodos rectificadores. Este proceso de carga y descarga se repite en cada etapa del multiplicador, lo que resulta en una acumulación gradual del voltaje a lo largo del circuito.

A partir de dos rectificadores de media onda conectados en serie se puede hacer un circuito rectificador de onda completa, añadiendo capacitores de la manera en que se muestra en la figura 2.6 [8], este es un doblador de voltaje.

Este particular sistema aprovecha el ciclo completo de AC, por lo que constituye un doblador de voltaje de onda completa.

Una de las configuraciones más básicas es el doblador de voltaje de onda completa, ilustrado en la figura 2.6. Este circuito utiliza dos capacitores y dos diodos para aprovechar tanto el ciclo positivo como el negativo de la señal de entrada, maximizando la eficiencia en la conversión de voltaje. Este diseño no solo duplica el voltaje, sino que también reduce el rizado en la señal de salida, mejorando su estabilidad. Variaciones de este circuito pueden incluir etapas adicionales que permiten triplicar, cuadruplicar o incluso multiplicar por un factor mayor el voltaje de entrada. Además, al invertir las polaridades de los diodos, es posible generar una salida de voltaje negativo, lo que amplía la versatilidad de los multiplicadores en aplicaciones prácticas. [4].

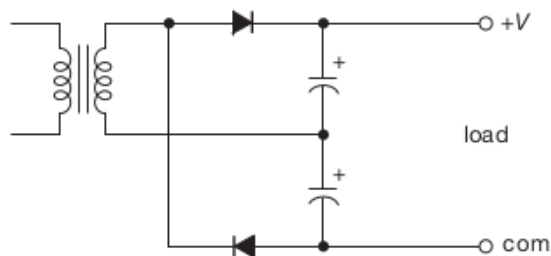


Figura 2.6: Circuito que multiplica el voltaje por un factor de 2 [8].

El rendimiento de un multiplicador de voltaje depende ampliamente de los capacitores empleados. Estos deben ser capaces de manejar altos niveles de voltaje y poseer valores lo suficientemente grandes para acumular la carga necesaria durante los ciclos de operación. Su doble función es esencial: por un lado, incrementan el voltaje en cada etapa, y por otro, filtran las oscilaciones en la señal de salida, asegurando un voltaje más uniforme y confiable. Si los capacitores no pueden mantener la carga bajo condiciones de alta demanda, el circuito puede experimentar caídas en el voltaje de salida, lo que limita su eficacia en aplicaciones que requieren un suministro de voltaje estable y elevado [7].

Este diseño de multiplicador de voltaje es ampliamente utilizado en aplicaciones donde se requiere un voltaje elevado a partir de una fuente de entrada modesta, como en fuentes de poder de alto voltaje, equipos de rayos X y detectores gaseosos, entre otros.

### 2.1.3. Voltaje de rizo

Las ondas de salida rectificadas tienen algunas limitantes. Efectivamente, son DC en el sentido de que no cambian su polaridad, sin embargo, presentan una serie de variaciones periódicas en el voltaje alrededor del valor fijo, esto es conocido como voltaje de rizo. El voltaje DC proveniente de un rectificador no es adecuado para alimentar un circuito, no hasta que este haya sido suavizado. Esto se logra añadiendo un capacitor de un valor relativamente grande, el cual tenga la capacidad de cargarse con el excedente de voltaje, que posteriormente será liberado en los ciclos que tengan un voltaje menor al esperado [8]. En cuanto la corriente del circuito es llevada cada vez más lejos, el voltaje comienza a caer tras cada pico, pero regresa al pico deseado al siguiente pulso. El resultado es voltaje DC con un pequeño rizo. Si el capacitor tiene la capacidad suficiente, y la carga no es muy grande, el voltaje de salida es casi DC puro [3].

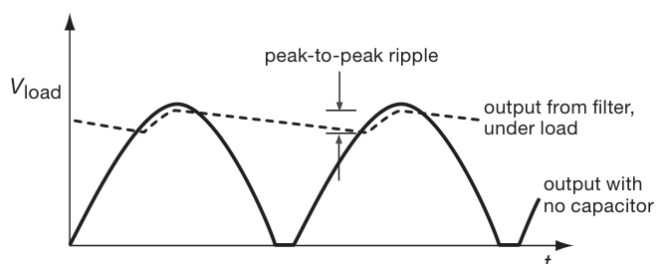


Figura 2.7: Voltaje de rizo de una fuente de poder.

### 2.1.4. Fuentes de voltaje

El control y la conversión de potencia son campos muy importantes en el diseño electrónico. Estos abarcan aplicaciones que van desde la transmisión de corriente continua (DC) de alto voltaje y alta corriente hasta aplicaciones de micro voltaje. En el diseño de circuitos, esto incluye la producción de los voltajes y corrientes necesarios para el funcionamiento de los circuitos electrónicos.

Las fuentes de voltaje son dispositivos esenciales en la electrónica y la ingeniería eléctrica, ya que proporcionan la energía necesaria para el funcionamiento de diversos circuitos y dispositivos electrónicos. Su función principal es mantener una diferencia de potencial constante entre dos puntos, lo que permite el flujo de corriente eléctrica. Estas fuentes pueden ser tanto de corriente continua (DC) como de corriente alterna (AC), adaptándose a diferentes aplicaciones y necesidades [8].

Prácticamente todos los circuitos electrónicos requieren una o más fuentes estables de voltaje DC. Las fuentes no reguladas (como los transformadores) no suelen ser adecuadas porque sus voltajes de salida cambian con la corriente y voltaje de entrada.

Las fuentes de voltaje reguladas están diseñadas para mantener un voltaje de salida constante incluso cuando la carga o el voltaje de entrada varían. Esto es crucial en aplicaciones sensibles donde las fluctuaciones de voltaje pueden causar fallos o daños en los circuitos. Las fuentes reguladas pueden ser lineales o conmutadas. Las fuentes lineales utilizan componentes pasivos como resistencias y capacitores, mientras que las conmutadas emplean interruptores electrónicos que operan a alta frecuencia para mantener la estabilidad del voltaje.

Una fuente de voltaje suele contener un transformador, el cual reduce o aumenta el voltaje, un circuito rectificador que se encarga de convertir la salida de voltaje AC en DC, y generalmente, un circuito regulador que produzca un voltaje estable incluso cuando la carga en la fuente varía [3].

La mayoría de fuentes de voltaje DC necesitan algo más que solamente el voltaje de salida proveniente de el rectificador que suele contener variaciones conocidas como voltaje de rizo, por lo que hace falta filtrar este voltaje, de manera que se intente mantener los picos de voltaje DC en su nivel deseado. Con un rectificador de onda completa, la frecuencia del voltaje de rizo suele ser mayor que si se usa un rectificador de media onda [7].

### 2.1.5. Fuentes conmutadas

Una fuente conmutada, también conocida como fuente de alimentación conmutada, o SMPS (Switch Mode Power Supply), es un tipo de fuente de alimentación que convierte la energía eléctrica de una forma eficiente utilizando un circuito de conmutación. A diferencia de las fuentes lineales que disipan energía a través de un transistor para regular la salida, una fuente conmutada emplea un interruptor que se activa y desactiva a alta frecuencia, junto con componentes como inductores, capacitores y transformadores [8].

Algunas de las ventajas de una fuente conmutada son:

- **Alta eficiencia:** El elemento de control (generalmente un transistor) está siempre en estado de conducción total o apagado, minimizando la energía disipada en forma de calor.
- **Tamaño reducido:** Al operar a frecuencias altas, los componentes como transformadores y condensadores pueden ser más pequeños.
- **Versatilidad:** Permiten obtener voltajes de salida mayores o menores que el voltaje de entrada, e incluso polaridades invertidas.

### 2.1.6. Oscilador Royer

El oscilador Royer es un circuito oscilador de corriente directa a corriente alterna (DC-AC) que utiliza transistores de conmutación para generar una onda cuadrada de alta eficiencia. Este diseño fue presentado inicialmente por G. H. Royer en 1955 como un conversor de corriente DC a AC que emplea transistores en modo de conmutación, lo que permite obtener una salida con una frecuencia proporcional al voltaje de entrada [11].

El circuito Royer es especialmente adecuado para aplicaciones que requieren una conversión de energía estable y eficiente, como fuentes de alimentación de alto voltaje y sistemas de telecomunicaciones. A diferencia de otros osciladores, el oscilador Royer produce una señal de salida simétrica y autooscilante que oscila sin necesidad de componentes externos adicionales para el control de frecuencia. Este comportamiento es posible debido a la retroalimentación positiva dentro del circuito, lo que permite que los transistores cambien de estado automáticamente.

Sus principios de funcionamiento son los siguientes:

- **Conmutación de Transistores:** El circuito utiliza dos transistores que alternan entre los estados de conducción y corte. Estos transistores están conectados a un transformador que permite invertir la polaridad de la corriente a través del núcleo de este, generando así una oscilación continua.

- **Transformador y Núcleo Magnético:** El transformador es fundamental en el oscilador Royer. La corriente en el núcleo magnético del transformador alterna entre los estados de saturación positiva y negativa, lo que estabiliza la frecuencia de oscilación y permite que la energía almacenada en el núcleo se libere de manera controlada.
- **Frecuencia de Oscilación:** La frecuencia de la señal de salida del oscilador Royer está determinada por el valor del voltaje de entrada DC y las propiedades del núcleo del transformador. Esto hace que el oscilador Royer sea especialmente útil en aplicaciones donde es necesario mantener una frecuencia de salida estable y proporcional al voltaje de entrada.

Este diseño tiene varias ventajas:

- **Eficiencia:** La conmutación en modo saturado de los transistores reduce la disipación de energía, lo que permite que el circuito opere con alta eficiencia.
- **Estabilidad:** La autooscilación del circuito asegura una frecuencia constante, incluso ante pequeñas variaciones en la carga o en el voltaje de entrada.
- **Simplicidad y Confiabilidad:** La construcción relativamente simple y el uso de pocos componentes adicionales convierten al oscilador Royer en una opción confiable para convertir DC en AC.

## 2.2. Ionización

Uno de los procesos más significativos para el funcionamiento de los detectores gaseosos es la ionización, un fenómeno fundamental en la física de partículas. En este proceso, partículas cargadas eléctricamente, como los electrones o muones, interactúan con los átomos de un medio, y tienden a perder parte de su energía mientras lo atraviesan. Cuando la energía transferida es mayor que la energía de enlace del electrón con el que ha colisionado, esto implica la liberación de uno o más electrones de los átomos del medio, lo que resulta en la creación de iones positivos y electrones libres. Este par es conocido como par ion-electrón [9].

Las secciones transversales de ionización, que describen la probabilidad de que ocurra la ionización, alcanzan su punto máximo para energías de electrones alrededor de 100 eV.

El primer potencial de ionización se refiere a la energía necesaria para eliminar un electrón de un átomo o molécula neutra, mientras que el segundo potencial de ionización representa la energía adicional requerida para eliminar un segundo electrón, dejando al átomo con una carga doblemente positiva [6].

El concepto de ionización primaria se refiere al número de colisiones ionizantes experimentadas por la partícula incidente. Además, algunos de los electrones liberados durante la ionización pueden tener la energía suficiente para causar nuevas ionizaciones, a esto se le llama ionización secundaria.

La ionización total producida será proporcional al número total de pares electrón-ion producidos por la ionización primaria y secundaria a lo largo de su trayectoria.

## 2.3. Formación de avalanchas

La observación inicial y los estudios subsiguientes sobre la multiplicación de avalancha de electrones en gases se atribuyen a John Townsend, quien investigó este fenómeno entre 1897 y 1901. Este proceso se desencadena cuando la relación entre la fuerza del campo eléctrico ( $E$ ) y la densidad del gas ( $n_A$ ), representada por  $E/n_A$ , alcanza un valor crítico. Durante el recorrido de un electrón libre a través del gas -bajo la influencia del campo eléctrico- este experimenta diversos tipos de colisiones con las moléculas y átomos circundantes, que se pueden clasificar en dos categorías principales: elásticas e inelásticas.

En las colisiones elásticas, el electrón simplemente modifica su trayectoria sin disminuir su energía cinética. Por consiguiente, al atravesar una región con una diferencia de potencial  $\Delta V$ , el electrón adquiere una energía cinética  $E_k = |q_e|\Delta V$ , donde  $q_e$  representa la carga elemental del electrón.

Por otro lado, las colisiones inelásticas adquieren relevancia en campos eléctricos elevados, ya que provocan una disminución en la energía cinética del electrón. Esto puede resultar en la excitación de diferentes niveles de átomos o moléculas, e incluso en su ionización, lo que da lugar a la aparición de un nuevo electrón libre dentro del volumen de gas [1].

En la siguiente figura se muestra un esquema de la formación de una avalancha en un gas:

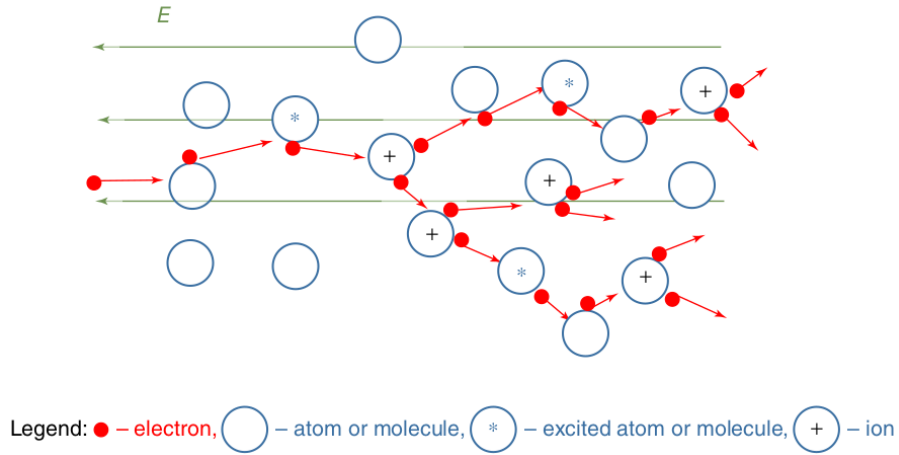


Figura 2.8: Un electrón libre (entrando por la izquierda) atraviesa un campo eléctrico lo suficientemente intenso para provocar colisiones elásticas e inelásticas con átomos y moléculas, resultando en la creación de nuevos electrones libres, además de átomos excitados o ionizados [1].

En el escenario más básico, donde las líneas del campo eléctrico  $E$  son paralelas al eje  $x$ , el incremento infinitesimal  $dn_e$  en el número de electrones libres  $n_e$  en una avalancha se puede expresar como:

$$dn_e = \alpha n_e dx \quad (2.1)$$

Aquí,  $\alpha$  representa el primer coeficiente de Townsend, que indica la probabilidad de que un electrón genere pares ion-electrón adicionales por unidad de longitud, y está relacionado con el campo  $E$ . Dado que los detectores gaseosos típicamente operan a presión constante, podemos ignorar la dependencia de  $n_e$ . Al integrar (2.1), se obtiene  $n_e = e^{\alpha d}$ , donde  $d$  es la distancia a través de la cual se desarrolla la avalancha, generalmente limitada por los electrodos.

Si  $n_0$  electrones primarios, localizados en  $x = 0$ , inician una avalancha, entonces el número total  $n_e$  de electrones generados será proporcional a  $n_0$ , es decir,  $n_e = n_0 e^{\alpha d}$ . El valor  $A = e^{\alpha d}$  se conoce comúnmente como el factor de multiplicación, ganancia del gas o simplemente ganancia.

## 2.4. Carga Espacial

Durante la formación de avalanchas en el volumen que contiene el gas (gap), se produce un fenómeno conocido como campo de carga espacial, donde las nubes de cargas iónicas y electrónicas que componen la avalancha están parcialmente superpuestas en el espacio, generando su propio campo eléctrico. Este campo se superpone al campo eléctrico aplicado, lo que resulta en una reducción del campo entre el electrón y las nubes de iones, y un refuerzo ascendente y descendente en relación con el campo aplicado. En consecuencia, la integral de línea del campo eléctrico entre

los electrodos, que define el campo a una diferencia de potencial constante, no debe cambiar (2.9). Por lo tanto, el campo de carga espacial puede ser contrario o favorable al campo aplicado en diferentes lugares. Este efecto da lugar a una ganancia total de la avalancha que es más pequeña de lo esperado en ausencia de este fenómeno, lo cual se refleja en la señal de salida del RPC.

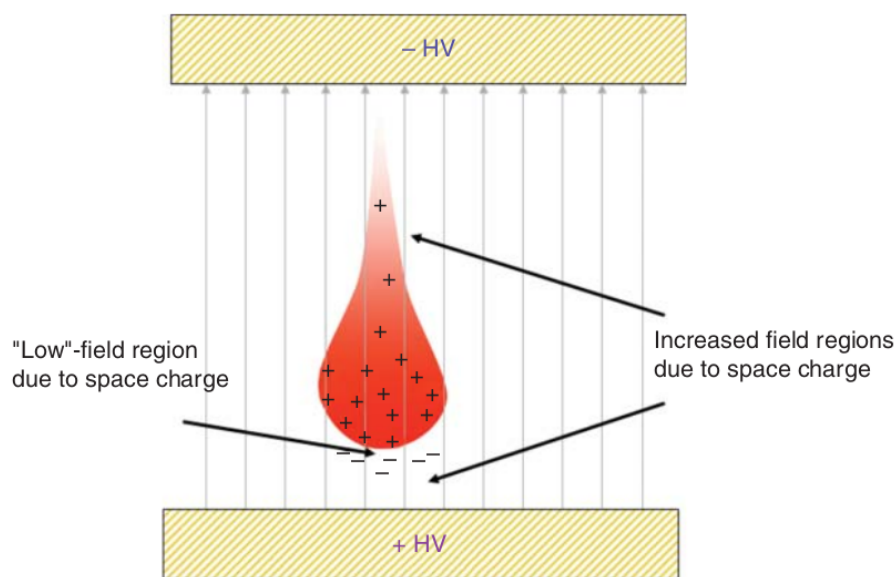


Figura 2.9: Concepto visual de una avalancha, con las regiones donde el campo eléctrico es significativamente distinto al campo aplicado debido a los efectos de la carga espacial[1].

## 2.5. RPCs

Las cámaras de placas resistivas (RPCs) son detectores gaseosos de partículas cuyos primeros prototipos modernos fueron desarrollados a principios de la década de 1980 por Rinaldo Santonico y Roberto Cardarelli. Estos investigadores establecieron los principios fundamentales de las RPCs modernas, que incluyen una geometría plana, el uso de materiales resistivos para los electrodos y la aplicación de alto voltaje a los mismos. Su concepto central radica en la producción de detectores de fácil construcción, lo que les permite cubrir grandes superficies de manera efectiva [1].

Las RPCs emplean electrodos de alta resistividad hechos de resina fenólica, también conocida como baquelita [1], que además es barata y de amplia disponibilidad, y tiene un volumen de resistividad de entre  $10^9$  y  $10^{10} \Omega \text{ cm}$  [13]. Entre los dos electrodos hay una separación (gap), la cual se llena de una mezcla de gases bajo presión atmosférica, que funciona como objetivo para la radiación ionizante. Cuando el gas es ionizado por una partícula cargada que cruza el detector, una descarga es producida por el campo eléctrico. Y dada la alta resistividad de los electrodos, se evita que esta descarga se propague por todo el gas. La resolución temporal típica de los RPCs de baquelita es de  $\sim 1 \text{ ns}$  cuando son operados alrededor de  $10 \text{ kV}$  [12].

A continuación se muestra el primer prototipo original de una RPC [12]:

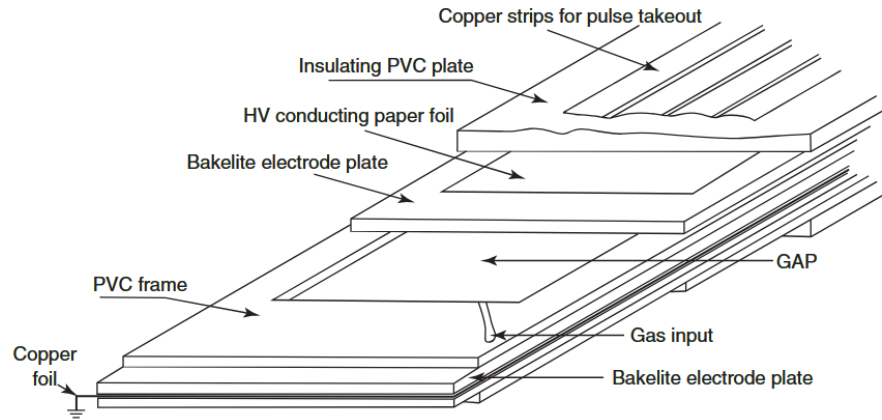


Figura 2.10: El primer prototipo de un RPC consistía de dos contadores idénticos rígidos puestos uno encima de otro, con la misma lámina de cobre como tierra común [1].

El campo eléctrico uniforme presente en el gap lleno de gas facilita la multiplicación de la ionización primaria, lo que a su vez puede desencadenar avalanchas de electrones. Durante la fase inicial de formación de estas avalanchas, el campo eléctrico uniforme de las RPCs amplifica exponencialmente cada grupo de ionización primaria en función de su distancia desde el punto de origen. En consecuencia, el espectro de señales de la RPC será amplio y distribuido de manera exponencial, lo que resulta en que la amplitud más probable esté próxima a cero. A medida que las avalanchas aumentan en tamaño, la carga espacial satura gradualmente el crecimiento exponencial de la avalancha, pasando de un crecimiento exponencial a uno lineal. Esto produce un pico en el espectro de la señal, lo cual es crucial para poder distinguir la señal del ruido [14].

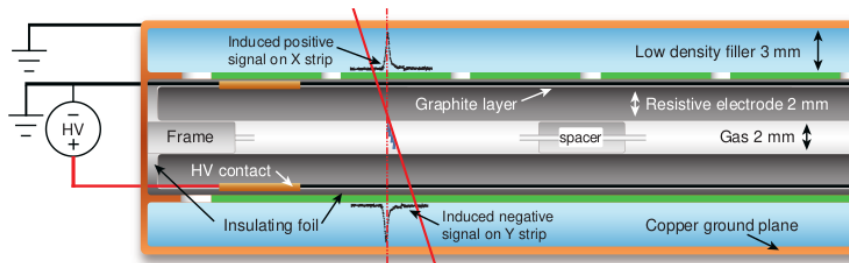


Figura 2.11: Esquema de la sección transversal de un RPC genérico de un solo gap [14].

### 2.5.1. RPCs de doble gap

Existen también las RPCs de doble gap (ver figura 2.12), cuya configuración permite que las señales de salida de ambos gaps sean inducidas en los mismos electrodos de salida. Usualmente, los strips de lectura están ubicados entre dos gaps. Una partícula ionizante que atraviesa este detector típicamente producirá pares ion-electrón en ambos gaps, y con la configuración adecuada, las señales inducidas por las avalanchas serán prácticamente simultáneas. Tener dos señales independientes relacionadas con la misma partícula incidente aumenta la eficiencia del detector.

Una RPC de doble gap tiene un mejor desempeño que una RPC de un solo gap. Además, en caso de que uno de los gaps, por alguna razón, no produzca una señal coherente, el otro gap aún puede proporcionar una señal aceptable [1].

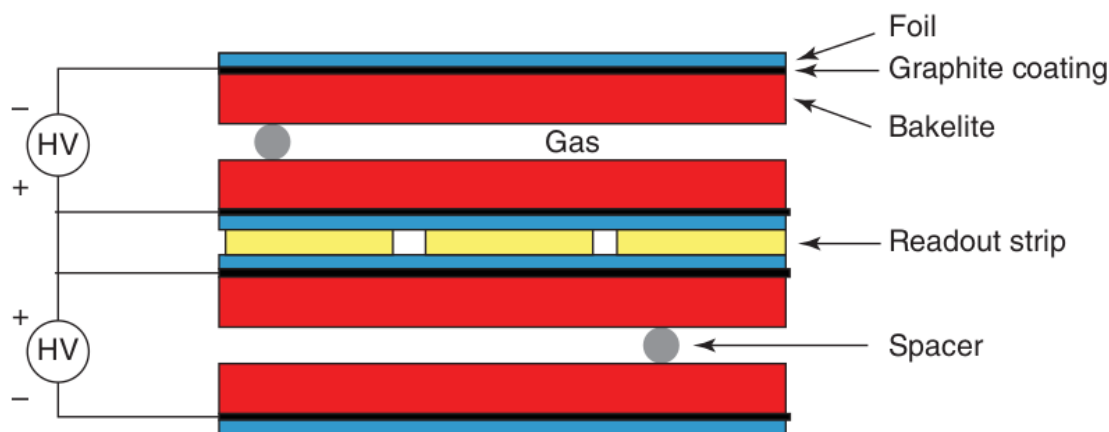


Figura 2.12: Esquema de una RPC de doble gap [1], notar que el voltaje se aplica de manera que los electrones producidos en ambos gaps se muevan en dirección de los strips. Bajo tales condiciones, ambas señales inducidas tienen la misma polaridad.

### 2.5.2. RPCs de vidrio

A partir del diseño original elaborado a principios de los años 80, han tenido lugar un importante número de actualizaciones y mejoras a este tipo de detectores. Las RPCs hechas de baquelita demostraron ser efectivas y de bajo costo, sin embargo, a pesar del tratamiento que se le daba a la superficie del electrodo, generaba mucho ruido en las mediciones, lo cual hacía difícil su calibración y monitoreo. En [2], se describe un diseño modular para una RPC hecha con vidrio común (como el de las ventanas), en vez de baquelita. Diseño que demostró ser más eficiente debido al bajo costo de los materiales utilizados.

Además del bajo costo, con este diseño se encontraron varias ventajas con respecto al diseño estándar de las RPCs, por ejemplo, la contención del gas es asegurada por una envoltura de PVC y no por los mismos electrodos, se usa un número discreto de espaciadores en vez de un número continuo, lo cual minimiza la zona geoméricamente muerta. Además, la estructura larga de los módulos optimiza el flujo de gas. Una serie de estudios mostró que su eficiencia de detección a largo plazo es sumamente estable [1].

## 2.6. Modos de Operación en las RPCs

Las RPCs operan principalmente en dos modos de funcionamiento: avalancha y streamer. Estos modos presentan características distintivas de respuesta ante campos eléctricos intensos y son seleccionados dependiendo de las necesidades de detección y la tasa de eventos a la que están expuestas las cámaras.

### 2.6.1. Modo Avalancha

En el modo avalancha, el RPC opera bajo un campo eléctrico suficientemente alto para inducir una multiplicación de carga controlada. Las partículas ionizantes que atraviesan el detector generan electrones que, al ser acelerados por el campo, provocan ionizaciones adicionales en el gas, generando una “avalancha” de electrones. Este proceso de multiplicación electrónica está limitado por el efecto de carga espacial, donde el campo eléctrico local disminuye en el centro de la avalancha debido a la presencia de iones positivos, limitando el crecimiento de la carga. Este mecanismo de

autorregulación permite mantener la avalancha en un estado controlado, evitando su transición a un estado más inestable y de mayor descarga, como el streamer [10].

Las simulaciones en el modo avalancha han demostrado que, al crecer la carga, el campo eléctrico experimenta variaciones que limitan la multiplicación. Este efecto se debe a que la carga espacial disminuye el campo en la región central del cúmulo de electrones, impidiendo que el crecimiento de la avalancha alcance niveles incontrolables. Este tipo de operación es ideal para aplicaciones que requieren estabilidad y alta eficiencia en la detección de partículas, como en el caso de los experimentos de física de partículas en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) [5].

### 2.6.2. Modo Streamer

El modo streamer representa una fase de operación en la que la descarga en el gas se intensifica, generando una corriente significativamente mayor entre los electrodos del RPC. Este fenómeno ocurre cuando el voltaje aplicado supera un umbral crítico, provocando que el campo eléctrico sea demasiado fuerte para ser regulado por la carga espacial de los iones. En este modo, la avalancha inicial evoluciona hacia una descarga completa, generando una señal de alta amplitud y duración debido a la creación de una trayectoria de alta conductividad entre los electrodos, lo cual resulta en una descarga local en el RPC [10, 5].

A medida que el voltaje se incrementa, la probabilidad de que ocurra una descarga tipo streamer también aumenta, alcanzando el 100% en ciertos niveles de campo eléctrico. Este modo es útil en situaciones donde se requieren señales amplificadas para una detección rápida, aunque a costa de un mayor desgaste del detector debido a las descargas intensas y a la reducción de su vida útil [10].



## Capítulo 3

# Desarrollo experimental

### 3.0.1. Revisión de diseño

A pesar de contar con un diseño previo para el prototipo de la HVPS (Ver diagrama en la figura 3.1, y los anexos), elaborado por el Dr. Guillermo Tejeda Muñoz, la construcción y puesta en marcha revelaron una serie de problemas significativos. Durante la fase inicial de pruebas, se detectaron conexiones incorrectas entre algunas pistas de la placa de circuito impreso (Printed Circuit Board, PCB) y los componentes, debido a errores de diseño. Estas conexiones erróneas afectaban el funcionamiento adecuado del sistema, lo que resultaba en un rendimiento inconsistente del HVPS.

El voltaje suministrado por el primer prototipo de HVPS no se mantenía constante, mostrando variaciones considerables que comprometían su utilidad al ser utilizado en una RPC. La variabilidad del voltaje era particularmente problemática para las aplicaciones que requieren un suministro de voltaje constante y fiable, como es el caso de las detecciones de partículas.

Además de los problemas con las conexiones, se identificó una área adicional de mejora: el divisor de voltaje colocado en la salida de los multiplicadores de voltaje utilizado para monitorear el voltaje. El diseño original del divisor de voltaje no proporcionaba mediciones suficientemente precisas del voltaje de salida de la HVPS. Esto era problemático, ya que una medición precisa del voltaje es crucial para asegurar que la HVPS esté operando dentro de los parámetros deseados.

Para abordar este problema, se consideró mejorar el diseño del divisor de voltaje. Un divisor de voltaje mejorado podría proporcionar mediciones más precisas y fiables, lo que es esencial para el monitoreo y ajuste del HVPS. Además, un diseño más seguro del divisor de voltaje contribuiría a la protección de los operadores y el equipo, reduciendo el riesgo de daños debido a voltajes excesivos o fallos en la medición.

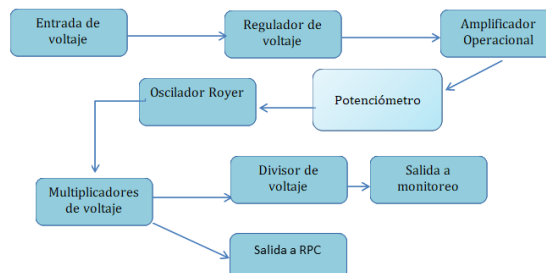


Figura 3.1: Diagrama del funcionamiento del prototipo de la HVPS.

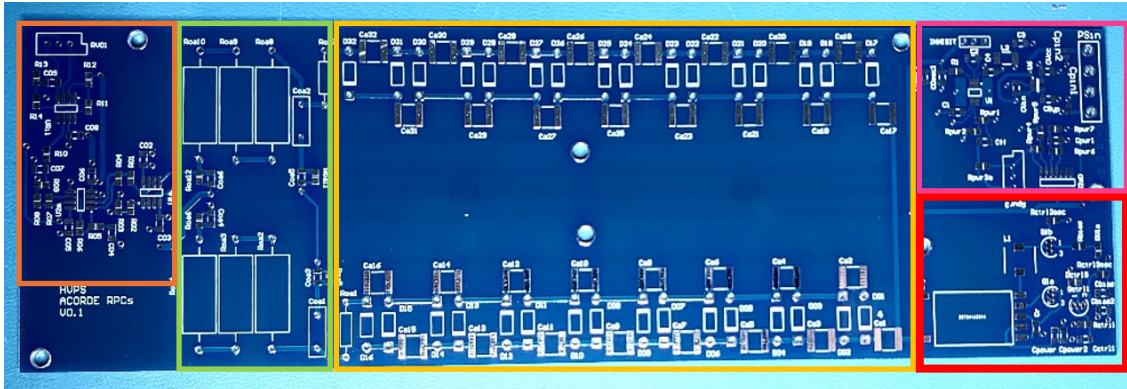


Figura 3.2: Fotografía de la parte frontal de la placa de la HVPS, antes de la soldadura de los componentes. Las áreas destacadas corresponden a: naranja, potenciómetro y regulación de voltaje; verde, divisores de voltaje; amarillo, multiplicadores de voltaje; rosa, entrada de voltaje; y rojo, oscilador Royer.

### 3.0.2. Montaje de componentes iniciales

A partir de los diagramas del circuito, se procedió a soldar los componentes correspondientes a la entrada de voltaje y regulación. Estos componentes incluyen capacitores, resistencias y circuitos integrados (Integrated Circuits, IC), que son esenciales para estabilizar y gestionar el suministro de energía dentro del circuito.

Los capacitores se utilizan para suavizar las fluctuaciones de voltaje, almacenando y liberando energía según sea necesario para mantener un nivel de voltaje constante. Las resistencias controlan el flujo de corriente a través de diferentes partes del circuito, protegiendo los componentes sensibles y ajustando los niveles de señal. Los IC integran múltiples funciones electrónicas en un solo chip, simplificando el diseño y mejorando la eficiencia del circuito.

Posteriormente, se soldó un potenciómetro, que es un componente crucial para ajustar el voltaje suministrado a un oscilador Royer. El potenciómetro permite variar la resistencia en el circuito, lo que a su vez ajusta el voltaje de salida.

El oscilador Royer, una vez alimentado por el voltaje adecuado, es responsable de convertir la corriente continua (DC) en corriente alterna (AC) y aumentar su voltaje. Este proceso es vital para aplicaciones que requieren niveles de voltaje más altos que los disponibles inicialmente. Se soldaron todos los componentes asociados con el oscilador Royer, asegurando que estén firmemente conectados y bien alineados para evitar problemas de funcionamiento.

Durante la soldadura, se prestó especial atención a la integridad de las conexiones, verificando que no hubiera puentes de soldadura no deseados y que todos los componentes estuvieran en sus posiciones correctas según los diagramas del circuito. Este paso es crucial para garantizar que el circuito funcione de manera eficiente y sin interrupciones.

### 3.0.3. Corrección de problemas de conexión

Sin embargo, durante el proceso de montaje, se descubrió un problema crítico: el potenciómetro encargado de regular la entrada de voltaje al transformador del oscilador tenía pistas conectadas de manera incorrecta. Esta configuración errónea impedía el flujo de corriente hacia el transformador, afectando directamente el funcionamiento del oscilador. Para solucionar este problema, se optó por un enfoque manual y preciso. Utilizando una navaja, se cortó cuidadosamente la pista defectuosa para interrumpir la conexión incorrecta. A continuación, se retiró el exceso de cobre para crear una separación clara entre los puntos de conexión erróneos.

Una vez realizadas estas modificaciones, se procedió a soldar puentes hacia otras pistas adecuadas para restablecer la conexión correcta. Este paso requirió precisión para asegurar que los puentes estuvieran firmemente conectados sin crear nuevos cortocircuitos o conexiones no deseadas. Este proceso garantizó que el potenciómetro pudiera regular adecuadamente la entrada de voltaje al transformador, permitiendo así el correcto funcionamiento del oscilador. Este proceso se realizó con ayuda de un microscopio, que permitiera ver a detalle todo el procedimiento, y evitar que quedaran rastros de cobre difíciles de ver a simple vista.

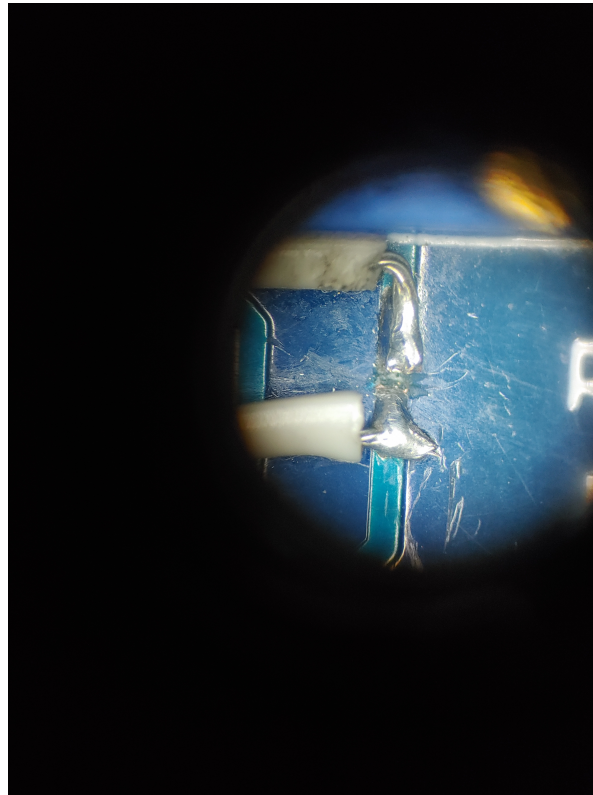


Figura 3.3: Imagen del corte en la pista de la conexión del potenciómetro y los puentes soldados bajo el microscopio.

Además, durante la revisión del diagrama del circuito, se identificó otra discrepancia importante. El diagrama indicaba que debía existir una conexión directa entre una de las salidas de un IC regulador de voltaje y una de las entradas del transformador. Sin embargo, al diseñar la placa de circuito impreso (PCB), esta conexión no se incluyó. La ausencia de esta conexión impedía que el regulador de voltaje suministrara la energía necesaria al transformador, comprometiendo la funcionalidad general del circuito.

Para remediar esta omisión, se decidió soldar un puente entre los dos puntos correspondientes: la salida del IC regulador de voltaje y la entrada del transformador. Esta solución involucró identificar los puntos exactos en la PCB, limpiar las áreas de soldadura para asegurar una buena conexión y luego soldar el puente de manera precisa. Esta conexión adicional permitió que el IC regulador pudiera alimentar correctamente al transformador, completando así el circuito según lo previsto en el diseño original.

Estos ajustes fueron cruciales para asegurar que el circuito funcionara de manera óptima. Cada modificación se realizó con cuidado para evitar daños y asegurar que todas las conexiones estuvieran sólidas y libres de interferencias. Este proceso de ajuste y corrección destaca la importancia de una

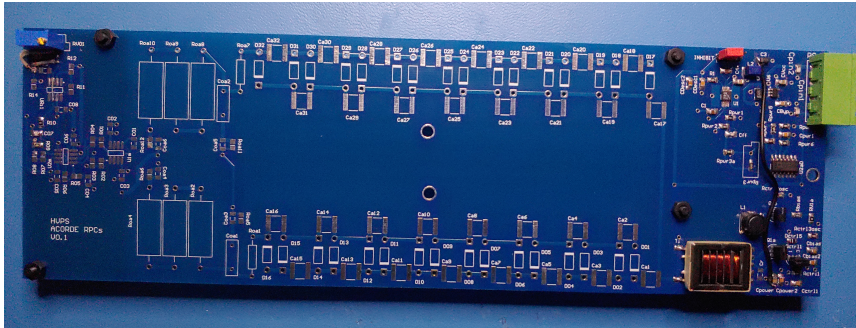


Figura 3.4: Placa de la HVPS, con los componentes iniciales ya soldados, del lado derecho se puede ver el puente.

verificación exhaustiva durante el montaje de circuitos complejos.

### 3.0.4. Verificación del funcionamiento del oscilador Royer

Una vez completada la construcción de estas secciones de la HVPS, se realizó una prueba inicial conectando una fuente de poder Rigol DP832 a la entrada de alimentación de la HVPS, y conectando la salida del transformador a un osciloscopio. El objetivo era verificar la presencia de oscilaciones en el voltaje, lo que confirmaría el funcionamiento adecuado del oscilador, cuyo fin es convertir DC en AC. Se tomaron varios oscilogramas que permitieran constatar las oscilaciones de voltaje que confirmen que da una salida de AC.

El siguiente oscilograma muestra el comportamiento poco antes de ser encendida la fuente de poder, y fracciones de segundo después:

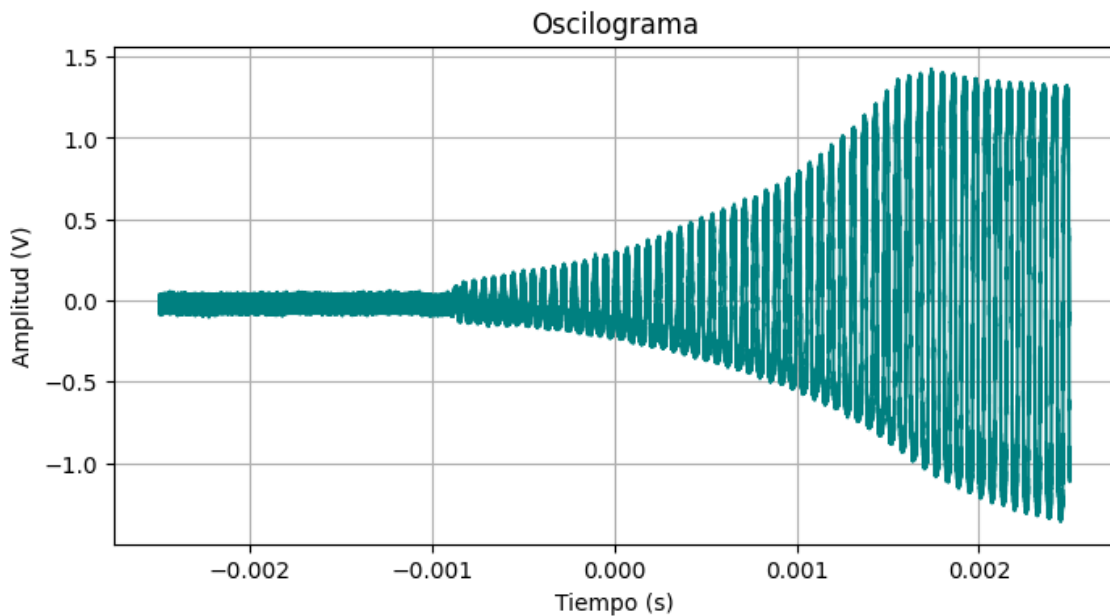


Figura 3.5: Se puede ver ruido antes de encender la fuente, tras esto, el voltaje aumenta y comienza a estabilizarse.

Se obtuvo una medición más, esta vez, registrando el voltaje poco después de encender la HVPS,

justo cuando el voltaje comienza a tener más estabilidad.

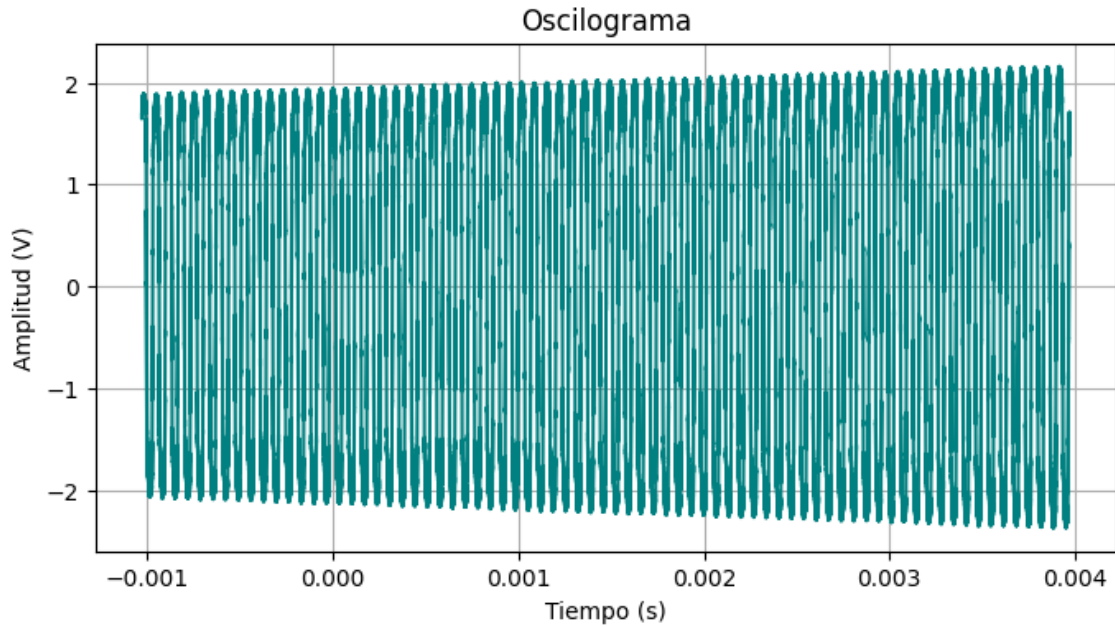


Figura 3.6: Se puede notar la estabilidad en los ciclos del voltaje, aún cuando este sigue aumentando.

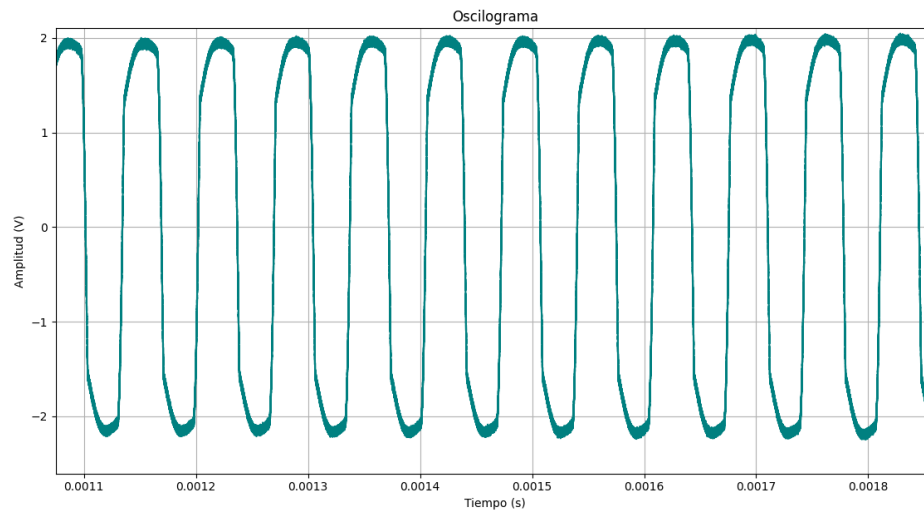


Figura 3.7: Detalle de las oscilaciones del voltaje.

Con esto se comprueba que el oscilador Royer está funcionando correctamente, por lo que acto seguido, se soldaron la mitad de las fases de multiplicación de voltaje, con el fin de poder hacer las pruebas pertinentes, y de ser necesario, se soldaría el resto.

Los multiplicadores cumplen dos funciones fundamentales: en primer lugar, multiplican el voltaje proporcionado por el transformador (aunque redundante, es crucial para destacar este aspecto);

en segundo lugar, rectifican las ondas de voltaje de corriente alterna, transformándolas en voltaje de corriente directa. Una salida del transformador se conecta a tierra (Ground, GND), dividiéndose la otra salida en dos partes. Cada una de estas partes se dirige a los multiplicadores, asignando uno para la fase positiva y otro para la negativa.

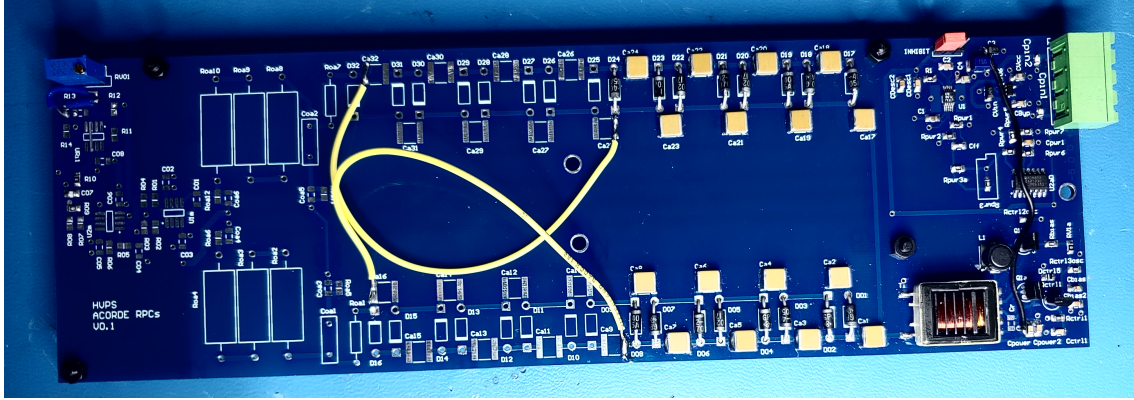


Figura 3.8: Fotografía de la HVPS, antes de añadir el divisor de voltaje para monitoreo.

### 3.0.5. Construcción de divisores de voltaje para monitoreo

Una vez soldados los multiplicadores, se construyó un divisor de voltaje para cada polaridad, con el fin de poder monitorear el voltaje de salida.

La inclusión de este divisor de voltaje es crucial, ya que la salida de la fuente alcanza niveles considerablemente elevados. Dado que el multímetro tiene una capacidad operativa limitada por debajo de los  $1000V$ , existe el riesgo de dañarlo irremediablemente al recibir un voltaje superior. Por esta razón, el divisor de voltaje fue concebido con la finalidad de permitir al multímetro detectar un voltaje  $V_{out} = 1V$  por cada  $V_{in} = 1000V$  de salida de la placa. Esto con el fin de tener una lectura de fácil conversión.

El diseño original contempla una resistencia de  $10M\Omega$ , una de  $1M\Omega$ , y dos de  $1G\Omega$  conectadas en serie, se tiene un espacio para colocar una resistencia SMD (Surface Mount Device, SMD) que se conecte a tierra, completando así el circuito para poder realizar el monitoreo. Es necesario determinar el valor que requiere dicha resistencia para obtener el voltaje deseado.

El voltaje de salida del divisor está dado por

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{in} \quad (3.1)$$

Donde  $V_{in}$  es el voltaje de entrada,  $V_{out}$  es el voltaje de salida, y  $R_1$  y  $R_2$  son dos resistencias. El voltaje de salida es siempre igual o menor al voltaje de entrada [8].

Utilizando la fórmula (3.1), se despeja para  $R_2$ , tomando a  $R_1$  como la suma de las resistencias en serie antes mencionadas. Entonces,  $R_1 = 11M\Omega + 2G\Omega = 2011000000\Omega \approx 2 \times 10^9\Omega$ , esto es:

$$R_2 = \frac{V_{out} R_1}{V_{in} - V_{out}}$$

$$R_2 = \frac{(1V)(2 \times 10^9\Omega)}{(1000V) - (1V)} = \frac{2 \times 10^9 V\Omega}{999V} = 2002002.002\Omega = 2.002M\Omega$$

Este valor es el requerido para obtener el voltaje deseado. Sin embargo, no hay una resistencia disponible en el mercado con este valor exacto. La resistencia con el valor más cercano que hay es de  $2M\Omega$ , por lo que se colocará esta.

Este enfoque se implementó para reducir significativamente las posibilidades de daño al multímetro y garantizar mediciones precisas, de fácil interpretación, y seguras.



## Capítulo 4

# Resultados

En este capítulo se presentan los resultados del análisis de los datos obtenidos mediante el uso de un osciloscopio durante las mediciones realizadas en el experimento. El objetivo principal es comprobar el funcionamiento correcto de la HVPS al ser integrada con una RPC.

### 4.0.1. Caracterización de voltaje

Una vez concluida la fase de construcción de la fuente, se dio inicio a la caracterización del voltaje de salida, tomando como referencia la corriente proporcionada por la fuente de alimentación Rigol DP832, y midiendo el voltaje de salida del divisor anteriormente construido. Se realizaron 3 series de mediciones, comenzando desde 0V, aunque se observó que la HVPS tiene un rango efectivo que comienza a partir de aproximadamente 2000V, hasta llegar al límite de multiplicación permitido por la HVPS. Se tomó el voltaje tanto de la fase positiva como de la fase negativa de forma separada, pero manteniendo la misma corriente.

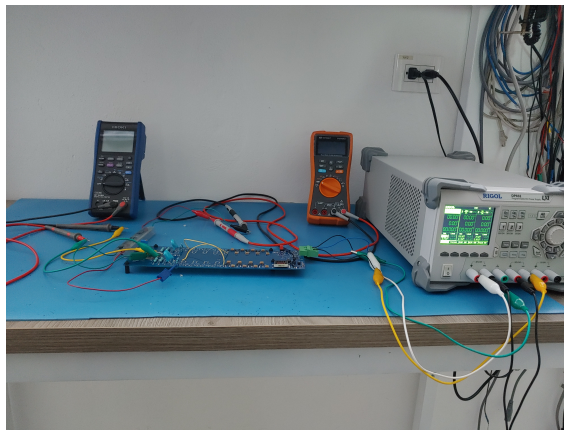


Figura 4.1: Fotografía del proceso de caracterización del voltaje.

Los resultados de las 3 series de mediciones se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 4.1: Medición 1

Medición 1		
Corriente (A)	Voltaje (+V)	Voltaje (-V)
0.03	2680	-2110
0.04	2970	-2360
0.05	3350	-2610
0.06	3530	-2940
0.07	3810	-3020
0.08	4010	-3310
0.09	4220	-3360
0.10	4440	-3580
0.11	4590	-3690
0.12	4770	-3850
0.13	4980	-4000
0.14	5190	-4130
0.15	5310	-4290
0.16	5450	-4420
0.17	5590	-4520
0.18	5740	-4630

Tabla 4.2: Medición 2

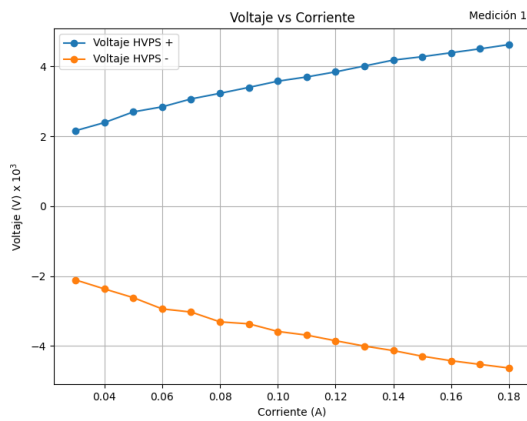
Medición 2		
Corriente (A)	Voltaje (+V)	Voltaje (-V)
0.03	2160	-2130
0.04	2350	-2340
0.05	2680	-2710
0.06	2880	-2950
0.07	3110	-3070
0.08	3320	-3350
0.09	3390	-3400
0.10	3640	-3610
0.11	3720	-3710
0.12	3860	-3890
0.13	4040	-4020
0.14	4140	-4260
0.15	4320	-4330
0.16	4420	-4400
0.17	4550	-4560
0.18	4670	-4670

Tabla 4.3: Medición 3

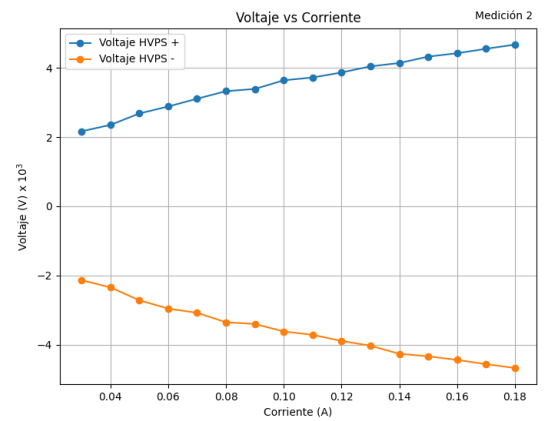
Medición 3		
Corriente (A)	Voltaje (+V)	Voltaje (-V)
0.03	2110	-2120
0.04	2410	-2370
0.05	2680	-2620
0.06	2910	-2900
0.07	3180	-3080
0.08	3340	-3290
0.09	3400	-3370
0.10	3660	-3630
0.11	3720	-3720
0.12	3830	-3850
0.13	4060	-4010
0.14	4120	-4250
0.15	4360	-4310
0.16	4410	-4400
0.17	4510	-4570
0.18	4630	-4620

Se decidió graficar los datos obtenidos(Figura 4.2), con el fin de poder visualizar más fácilmente sus tendencias:

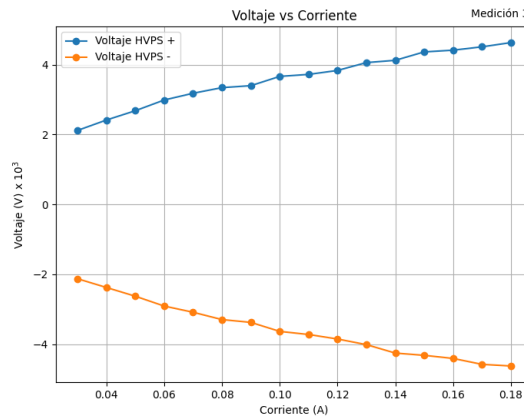
Figura 4.2: Resultados de las mediciones de voltaje



(a) Primera serie de mediciones



(b) Segunda serie de mediciones



(c) Tercera serie de mediciones

En la figura 4.3 se muestra una gráfica que combina los resultados de las 3 series de mediciones, donde pueden verse curvas simétricas, lo cual indica que su funcionamiento es correcto. Las variaciones entre ellas son debido al amplio recorrido que tiene el potenciómetro.

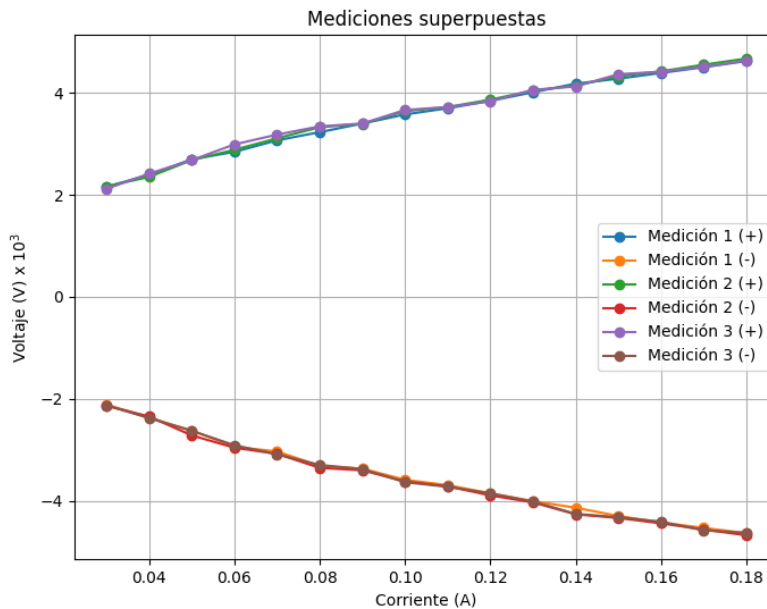


Figura 4.3: Gráfica de las 3 series de mediciones combinadas.

Es posible apreciar que en las gráficas de la figura 4.3 las curvas se superponen y la variación entre ellas es poco perceptible.

Posteriormente, se incluyó una medición adicional: la salida del potenciómetro encargado de suministrar el voltaje a la entrada del transformador del oscilador. Esto se hizo con el propósito de caracterizar la salida de voltaje específica del potenciómetro en relación con el voltaje general de salida, con el fin de conocer el rango efectivo de funcionamiento de los multiplicadores de voltaje. Para llevar a cabo esta medición, se integró un segundo multímetro, el cual se conectó directamente a la salida del potenciómetro. Dado que las salidas de cada polaridad de la HVPS son iguales, pero con signo distinto, se puede tomar la medida únicamente de una polaridad, en este caso, la positiva. Hay que recordar que el voltaje monitoreado está dividido entre 1000 con respecto al voltaje real de salida.

Los resultados se muestran en la tabla 4.4, y en las gráficas de las figuras ?? y ?? muestran los datos antes mencionados, al igual que su línea de tendencia, obtenida mediante regresión lineal. En ambas se nota un crecimiento lineal como es de esperarse.

En la gráfica de la figura 4.4 pueden observarse ambas mediciones, es posible apreciar que la variación entre ambas mediciones es mínima, lo que confirma su estabilidad.

Tabla 4.4: Comparación de voltajes monitoreados y del potenciómetro

V. Monitoreado (V)	Volt. Pot. (V)	V. Monitoreado (V)	Volt. Pot.(V)
2.402	4.058	2.397	4.059
2.662	4.076	2.574	4.070
2.838	4.099	2.837	4.100
3.156	4.140	3.125	4.138
3.338	4.170	3.335	4.174
3.502	4.190	3.534	4.199
3.726	4.215	3.750	4.221
3.912	4.234	3.884	4.234
4.110	4.263	4.079	4.266
4.293	4.277	4.277	4.282
4.501	4.299	4.430	4.301
4.612	4.312	4.645	4.324
4.770	4.330	4.770	4.339
4.904	4.351	4.902	4.353

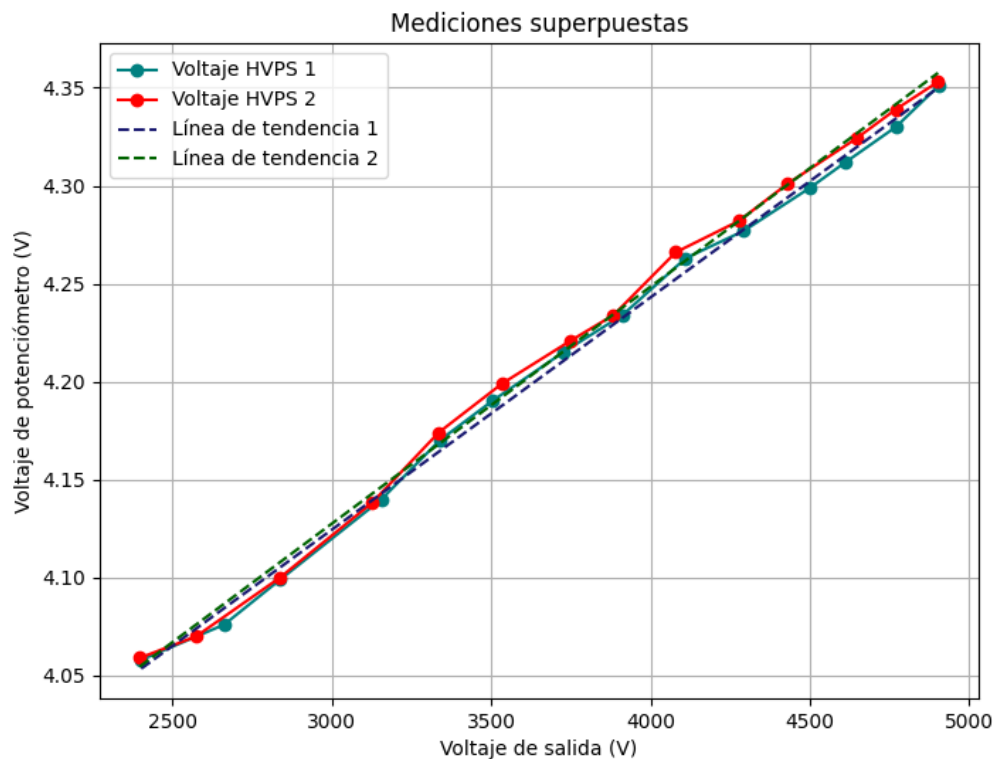


Figura 4.4: Mediciones superpuestas con su línea de tendencia.

Después de analizar estos resultados, se encontró que el rango efectivo trabajo del oscilador Royer comenzaba a partir de los 4V de salida del potenciómetro. En respuesta a este hallazgo, se llevó a cabo una modificación en el pin de entrada del potenciómetro, incluyendo un nuevo divisor de voltaje conectado a una salida de VCC (Voltage at Common Collector). Este ajuste tenía como

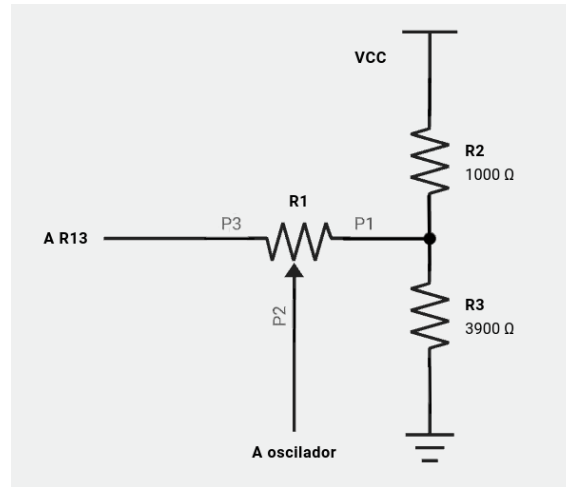


Figura 4.5: Esquema del nuevo circuito propuesto para la regulación de voltaje entre 4V y 5V (Ver figura A.2 en anexos)

objetivo restringir el funcionamiento del potenciómetro únicamente a partir de los 4V. De otra forma, se tendría que girar continuamente el potenciómetro para poder aumentar el voltaje, y con esta modificación, se podría trabajar únicamente en el rango efectivo, además de poder tener un mejor control del voltaje de salida, haciendo que las variaciones de este sean mínimas.

El objetivo es ajustar el rango de operación del pin de entrada del potenciómetro para que funcione dentro de un intervalo específico, en este caso, de 4V a 5V, en lugar del estándar de 0V a 5V. Esto implica que uno de los pines del potenciómetro debe recibir una tensión de 5V, mientras que el otro debe recibir 4V. Inicialmente, uno de los pines del potenciómetro estaba conectado directamente a 5V de VCC, mientras que el otro estaba conectado a tierra (GND), lo que permitía regular el voltaje desde 0V hasta 5V.

Para ajustar este rango, se implementó un divisor de voltaje. Uno de los pines del potenciómetro permanece conectado a VCC, mientras que el otro se conecta a la salida del divisor, que proporciona una entrada de 4V. El divisor de voltaje, a su vez, está conectado entre VCC y GND, generando una salida intermedia de 4V. De esta manera, se logra que el pin del potenciómetro opere dentro del rango deseado de 4V a 5V.

Usando nuevamente la fórmula (3.1), se determinarán los valores de las resistencias necesarias para obtener un  $V_{out}$  de 4V a partir de un  $V_{in}$  de 5V. Para este cálculo, se tomará un valor fijo para  $R_1$ ; en este caso, se usará  $R_1 = 1000\Omega$ , dado que se dispone de un amplio número de resistencias con este valor, lo que facilita el proceso. Así, se despejará  $R_2$  utilizando la fórmula obtenida previamente y se sustituirán los valores correspondientes.

Haciendo las sustituciones correspondientes, se obtiene que

$$R_2 = \frac{V_{out}R_1}{V_{in} - V_{out}} = \frac{(4V)(1000\Omega)}{5V - 4V} = 4000\Omega$$

Este es el valor de la resistencia que se necesita para lograr obtener  $V_{out} = 4V$ , sin embargo, debido a que no hay una resistencia con este valor en el mercado, y la más cercana es de  $3900\Omega$ , se utilizará esta. En la figura 4.5 se muestra el esquemático del diagrama del nuevo circuito para el potenciómetro.

Tras implementar este ajuste, se realizaron pruebas simples para corroborar que la salida del voltaje fuera efectivamente entre 4V y 5V. Después de realizar diversas pruebas, se comenzaron a generar chispazos y arcos eléctricos entre varios componentes, debido al voltaje tan alto de salida. Ante esta situación, se decidió aislarlos utilizando silicón, sin embargo, algunos componentes de la

placa resultaron seriamente dañados durante estos chispazos y no fue posible repararlos con éxito. Por lo tanto, se optó por tomar la HVPS construida previamente, y realizarle las modificaciones pertinentes para poder continuar con el proceso. Se hizo notorio que la distancia entre algunas pistas es muy corta, y al tener una gran cantidad de carga, se producen arcos eléctricos. Para este prototipo, nuevamente se aislaron dichas pistas con silicón para minimizar el riesgo de formación de arcos eléctricos.

Una vez completado este paso y después de verificar el funcionamiento adecuado de la placa, fueron soldados los cables correspondientes a la salida de voltaje, para poder conectarla a la RPC.

La RPC utilizada es de dos gaps de  $1\text{mm}$ , y se conectó a un tanque de gas argón para su limpieza. Una vez completada la limpieza, se procedió a conectar la RPC a la HVPS, asegurándose de que cada polaridad estuviera correctamente emparejada con su correspondiente en la RPC.

La RPC está equipada con 8 tiras (stripes), cada uno de los cuales tiene dos cables de salida correspondientes. Estos cables se conectaron a un osciloscopio para registrar la variación del voltaje en el tiempo, causada por el paso de muones a través de la RPC. El propósito de estas mediciones es verificar el correcto funcionamiento de la RPC con el voltaje suministrado por la HVPS. Por lo tanto, para fines prácticos, se registraron datos solo de 2 stripes de manera independiente. Cabe destacar que, debido a un error en la soldadura de los cables de salida de los stripes del RPC a un conector de múltiples pines, no se siguió un patrón, lo que imposibilitó tomar las señales provenientes de estos. En consecuencia, se optó por cortar los cables del conector y pelar dos pares de cables, correspondientes a stripes distintos, para conectarlos de manera independiente al osciloscopio. Para futuros usos de la RPC, se restablecerá la conexión con el conector de salida.

Una vez que se puso en marcha el flujo de gas a través de la RPC, se encendió la HVPS y se ajustó inicialmente a un voltaje de  $8000\text{V}$  para corroborar su correcto funcionamiento. Tras unos segundos de estabilización del voltaje, se observó en el osciloscopio una señal (figura 4.6), lo que confirmó que la HVPS estaba cumpliendo su propósito.

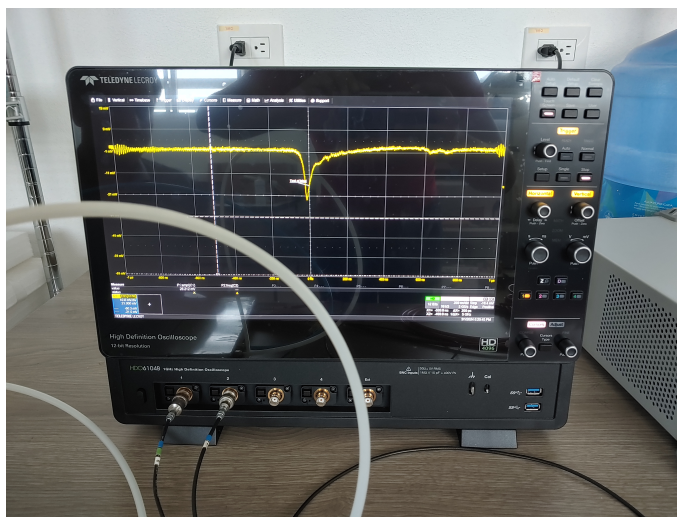


Figura 4.6: Una de las primeras señales registradas por el osciloscopio.

Se ajustó el potenciómetro de la HVPS para obtener voltajes específicos de  $3220\text{V}$ ,  $3560\text{V}$ ,  $3880\text{V}$ ,  $4200\text{V}$  y  $4400\text{V}$ , por polaridad. Es importante tener en cuenta que el voltaje se monitorea mediante un multímetro, y los valores mencionados corresponden únicamente al polo positivo de la HVPS. Al conectar la HVPS al RPC, el voltaje total es el doble del monitoreado, es decir,  $6440\text{V}$ ,  $7120\text{V}$ ,  $7760\text{V}$ ,  $8400\text{V}$  y  $8800\text{V}$ , respectivamente. Este ajuste se realizó para observar el comportamiento de la HVPS en diferentes niveles de voltaje.

Para registrar los datos con el osciloscopio, se decidió tomar alrededor de 500 eventos en los

voltajes antes mencionados por cada strip, lo que resultó en un total de 10 mediciones.

#### 4.0.2. Descripción de los Datos

Los datos fueron recopilados utilizando un osciloscopio, y cada señal registrada se almacenó en archivos de formato .csv, donde cada archivo correspondía a un evento específico. Debido a la gran cantidad de archivos generados, se implementó una estrategia eficiente de análisis masivo utilizando herramientas de programación y procesamiento de datos.

Para este propósito, se utilizó el lenguaje de programación Python, por su eficiencia y facilidad en la manipulación de datos. Los archivos de datos se organizaron en 10 carpetas distintas, y se desarrolló un programa para leer la estructura de los archivos .csv, extrayendo los parámetros clave: tiempo y amplitud.

#### 4.0.3. Análisis Estadístico Inicial

Una vez comprendida la estructura de los archivos, se calcularon estadísticas descriptivas, como el número de muestras y la duración de cada evento. Posteriormente, se desarrolló un programa que leyera los archivos de cada carpeta, analizara las señales y calculara la desviación estándar de cada archivo. Se utilizó el promedio de las desviaciones estándar para identificar características típicas de los eventos y descartar aquellos con ruido excesivo.

Para filtrar los archivos, se estableció un criterio basado en la desviación estándar: solo se conservaron aquellos archivos cuya desviación estándar se encontraba dentro del  $\pm 50\%$  del promedio de las mediciones. Este enfoque permitió eliminar eventos con ruido elevado o señales de muy baja amplitud.

#### 4.0.4. Resultados del Filtrado de Datos

Después de aplicar el filtro, se calculó nuevamente la desviación estándar promedio para cada medición. Las siguientes tablas muestran los resultados de las desviaciones estándar antes y después del filtrado, el voltaje suministrado por la HVPS:

Voltaje (V)	Desv. Est. antes de filtrar	Desv. Est. después de filtrar
6440	0.0046041648214938825	0.004103359945244189
7120	0.008329671447675662	0.007436893037199042
7760	0.007052224318341787	0.00640826250943637
8400	0.004605108588558625	0.004339884088614711
8800	0.004579983533984366	0.004433411679807805

Tabla 4.5: Resultados del análisis de datos para el primer Strip

Voltaje (V)	Desv. Est. antes de filtrar	Desv. Est. después de filtrar
6440	0.005478755943644896	0.004782588184568074
7080	0.004679720380256306	0.0043866873131981525
7720	0.005300555279711633	0.005102566617653813
8360	0.004685346920400192	0.004492618679114791
8800	0.004848281079298446	0.0045294614306509605

Tabla 4.6: Resultados del análisis de datos para el segundo Strip

#### 4.0.5. Desempeño de la RPC con la HVPS

Tras filtrar las señales, se calculó el promedio de las amplitudes mínimas de los eventos en cada serie de mediciones. A continuación, se muestra una gráfica que relaciona el voltaje suministrado por la HVPS con el promedio de las amplitudes mínimas:

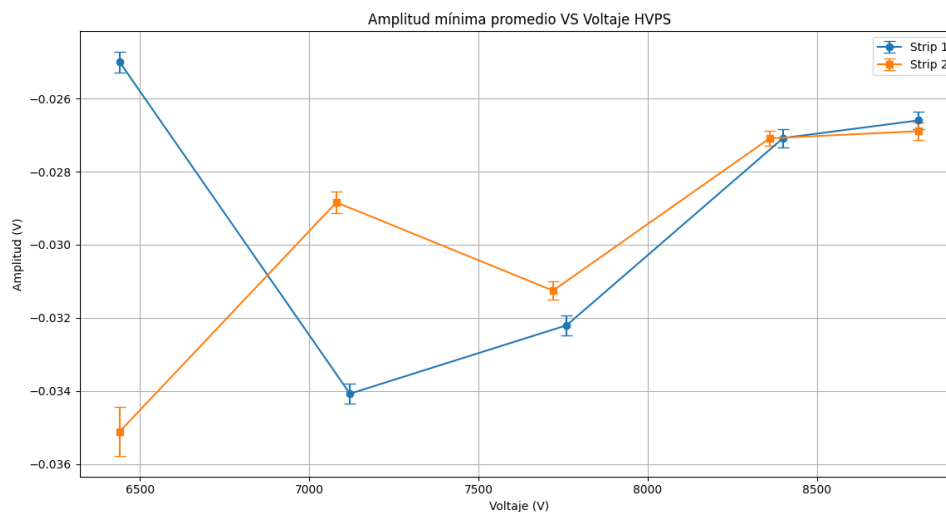


Figura 4.7: Amplitud mínima promedio VS el voltaje suministrado por la HVPS.

Se aprecia en la figura 4.7, que hasta antes de alcanzar un voltaje de alrededor de 7700 V, la amplitud mínima promedio no es del todo consistente, ya que cada serie de mediciones arroja datos algo dispersos entre sí. A partir de dicho voltaje, comienza a observarse una mayor estabilidad, y se vuelve incluso reconocible un patrón.

A continuación se presenta la relación del promedio de la carga integrada de cada medición con respecto al voltaje de la HVPS:

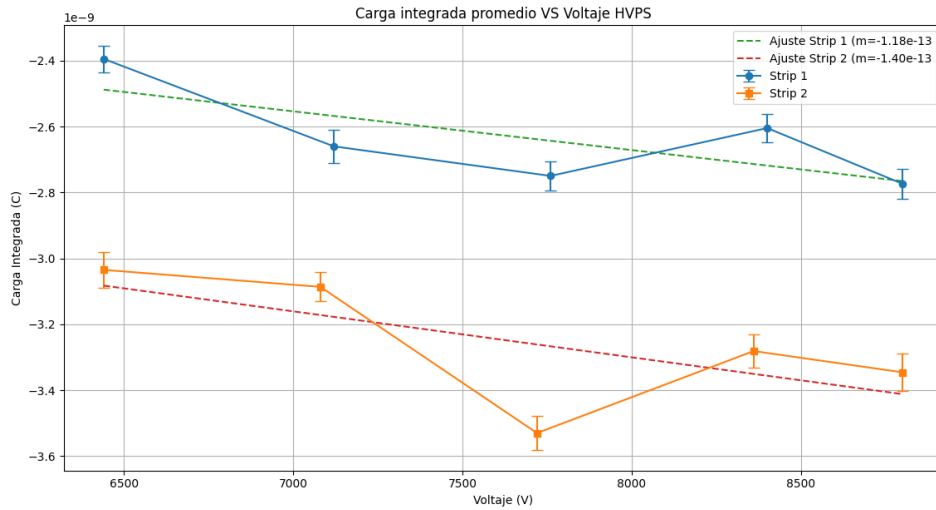


Figura 4.8: Carga integrada promedio VS el voltaje suministrado por la HVPS

En la figura 4.8, se puede notar un patrón muy similar en ambas series de mediciones, con ligeras variaciones en la carga integrada, pero con pendientes bastante cercanas entre sí. Por medio de una regresión lineal, se observa que la pendiente de ambas series es muy cercana.

De manera más detallada, se muestran en las figuras a partir de la siguiente página las gráficas correspondientes al número de eventos con respecto a la carga integrada y la amplitud mínima de las series de mediciones.

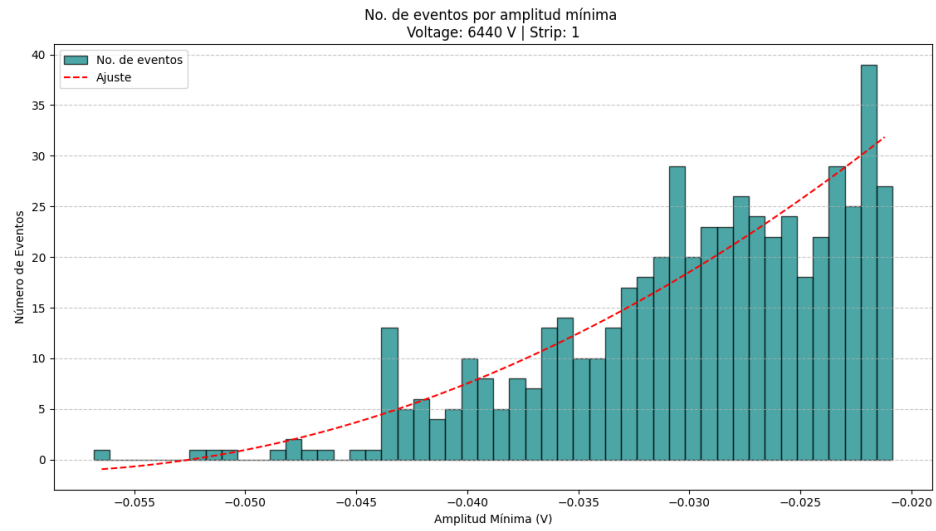


Figura 4.9: Eventos VS Amplitud, 6440 V, Strip 1.

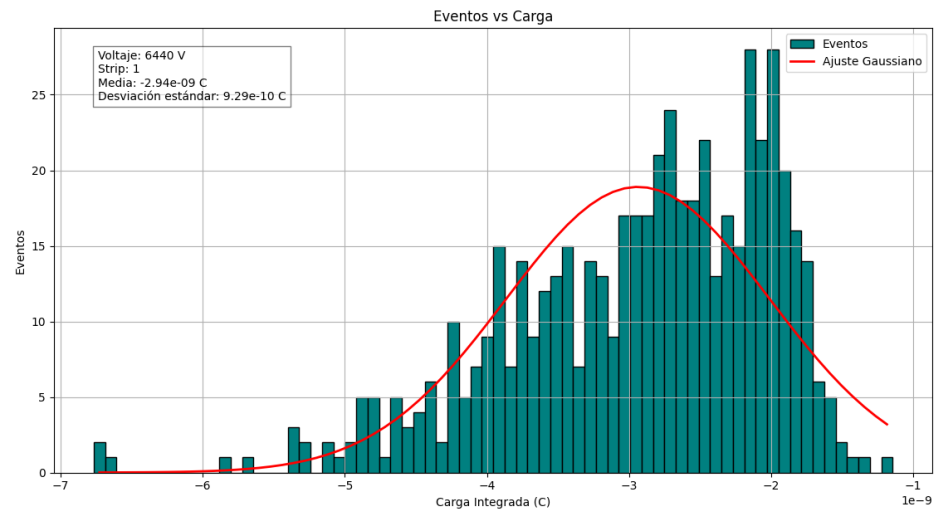


Figura 4.10: Eventos VS Amplitud, 6440 V, Strip 1

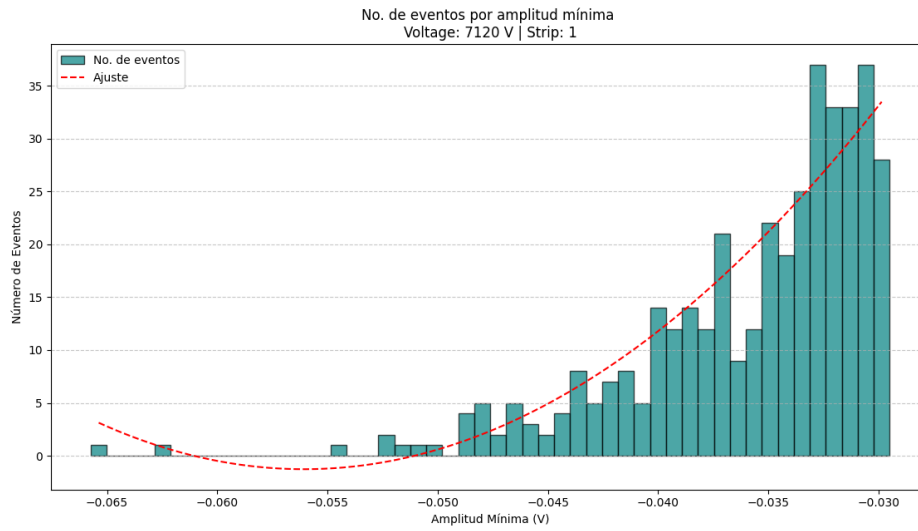


Figura 4.11: Eventos VS Amplitud, 7120 V, Strip 1.

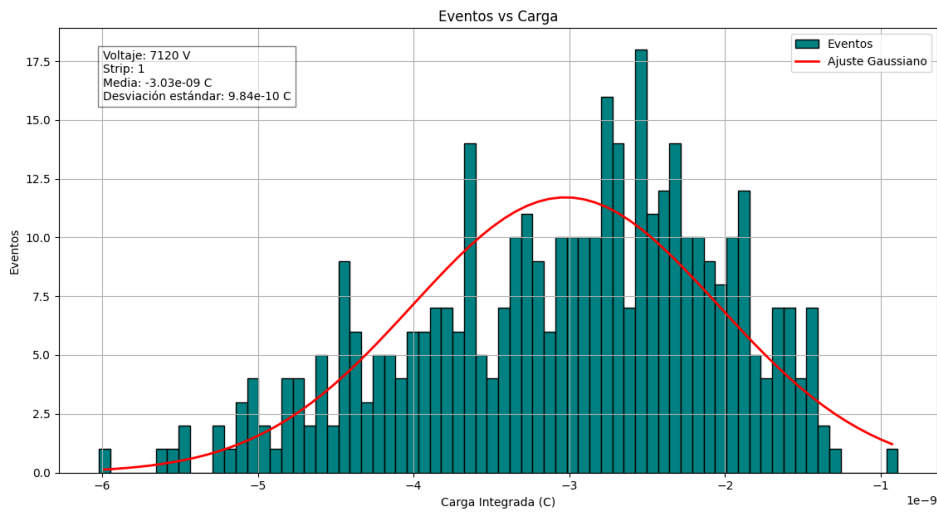


Figura 4.12: Eventos VS Carga, 7120 V, Strip 1.

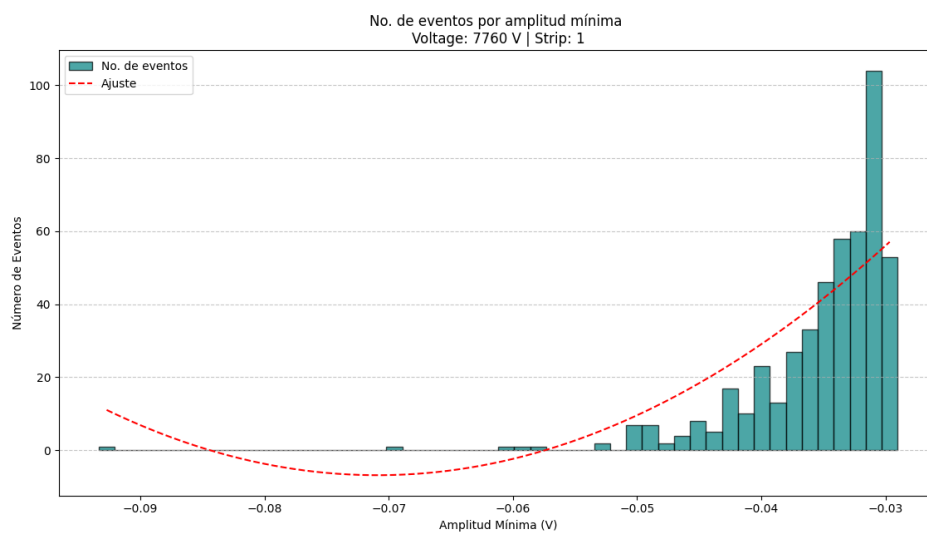


Figura 4.13: Eventos VS Amplitud, 7760 V, Strip 1.

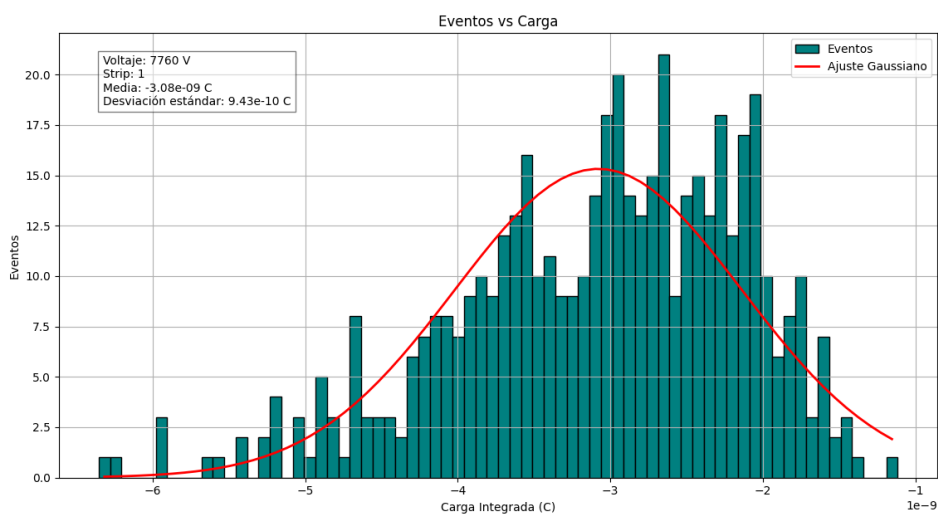


Figura 4.14: Eventos VS Carga, 7760 V, Strip 1.

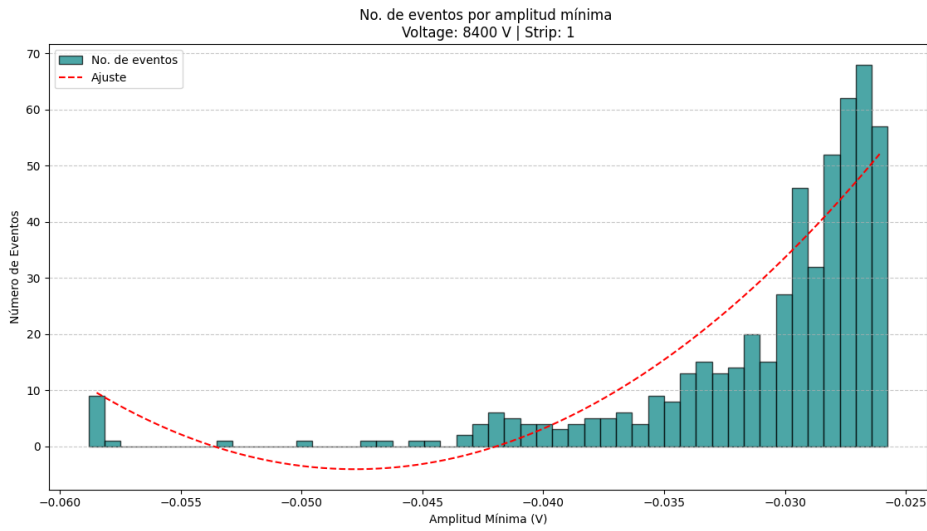


Figura 4.15: Eventos VS Amplitud, 8400 V, Strip 1.

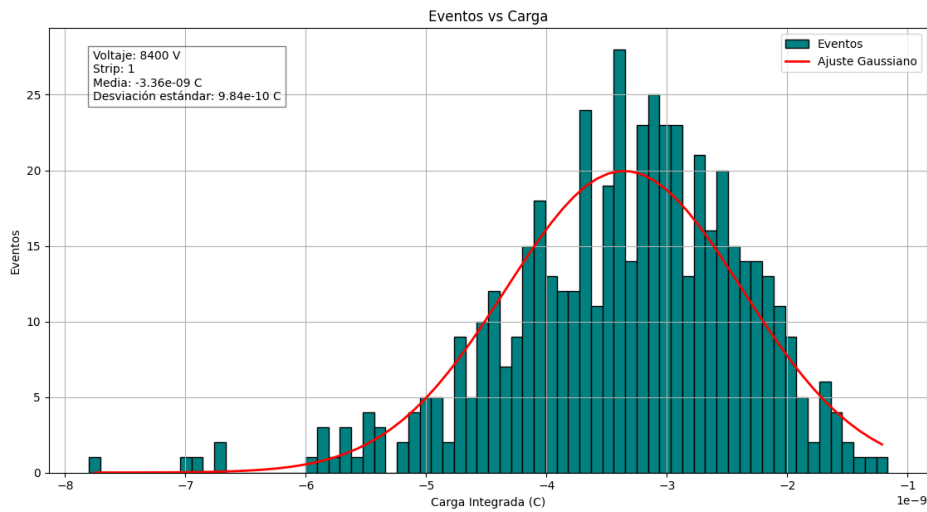


Figura 4.16: Eventos VS Carga, 8400 V, Strip 1.

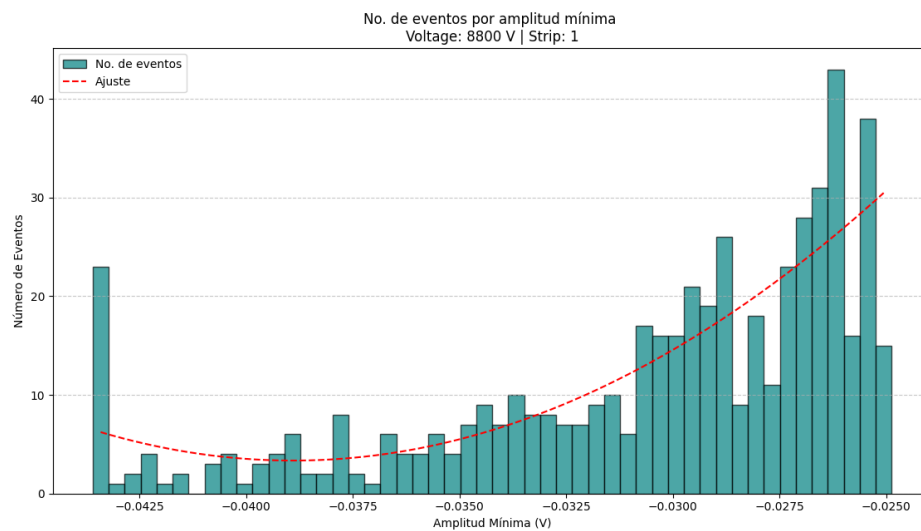


Figura 4.17: Eventos VS Amplitud, 8800 V, Strip 1.

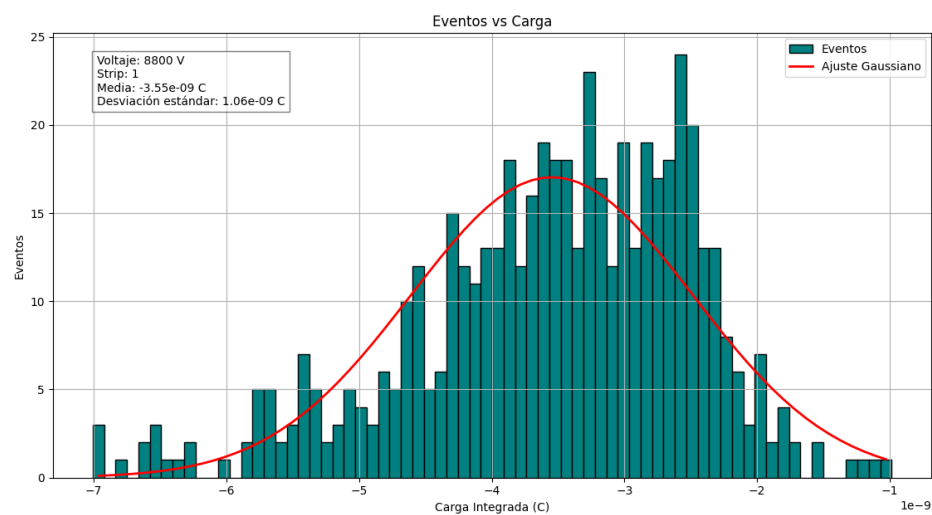


Figura 4.18: Eventos VS Carga, 8800 V, Strip 1.

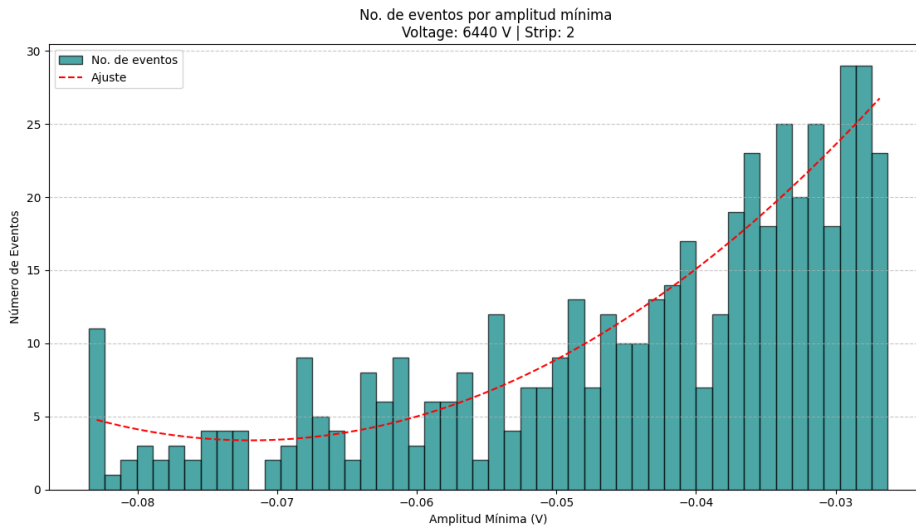


Figura 4.19: Eventos VS Amplitud, 6440 V, Strip 2.

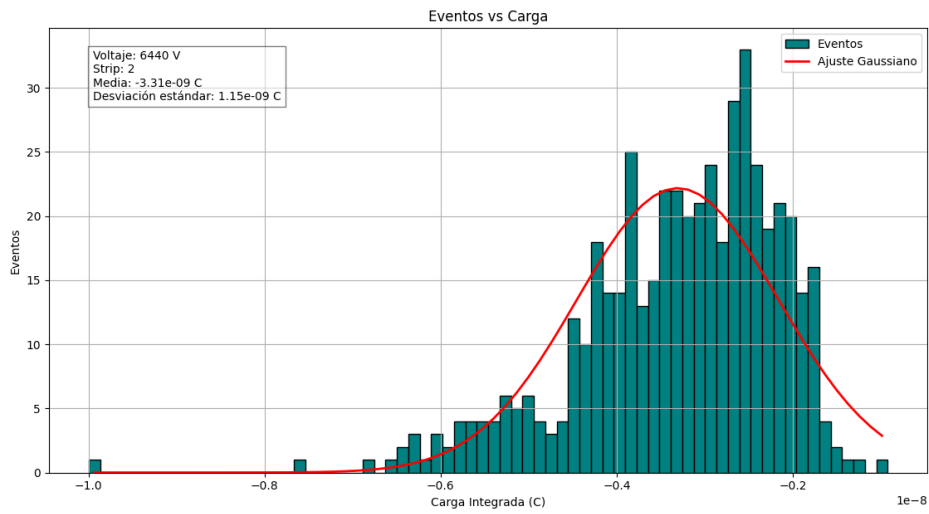


Figura 4.20: Eventos VS Carga, 6440 V, Strip 2.

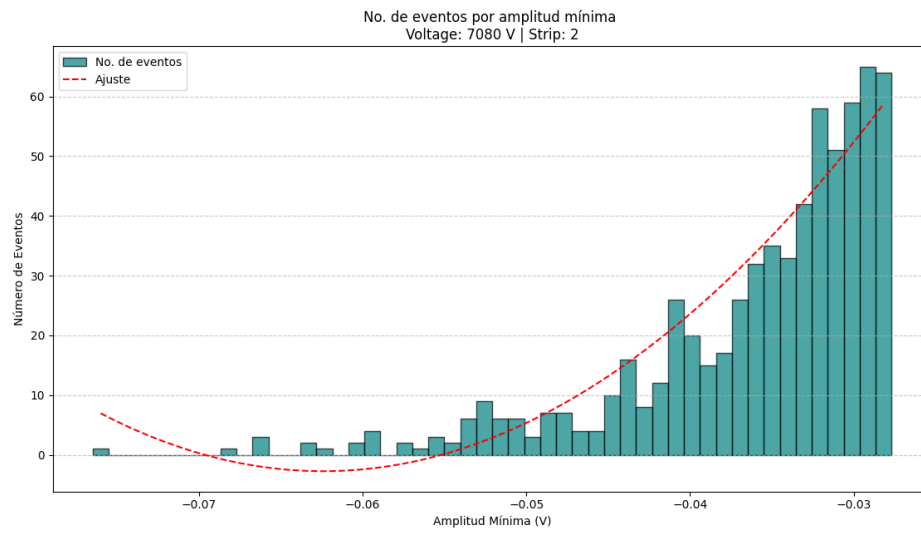


Figura 4.21: Eventos VS Amplitud, 7080 V, Strip 2.

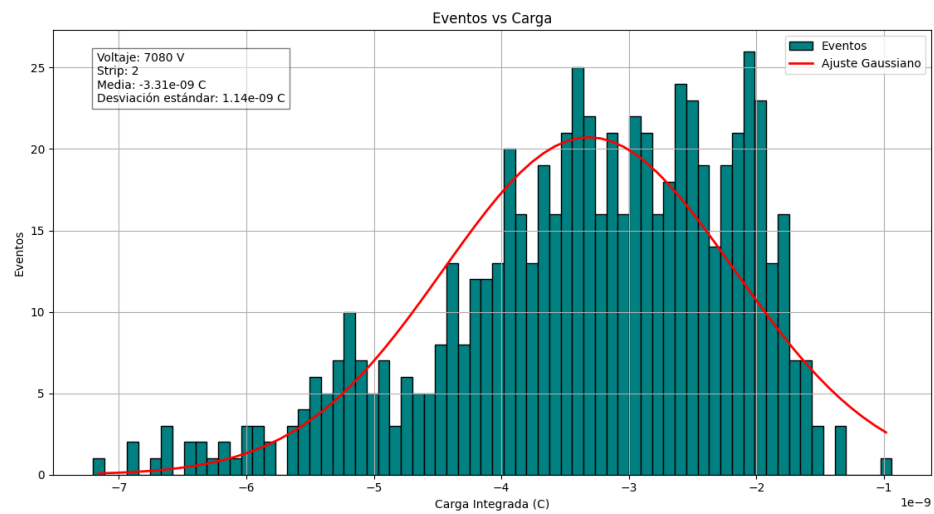


Figura 4.22: Eventos VS Carga, 7080 V, Strip 2.

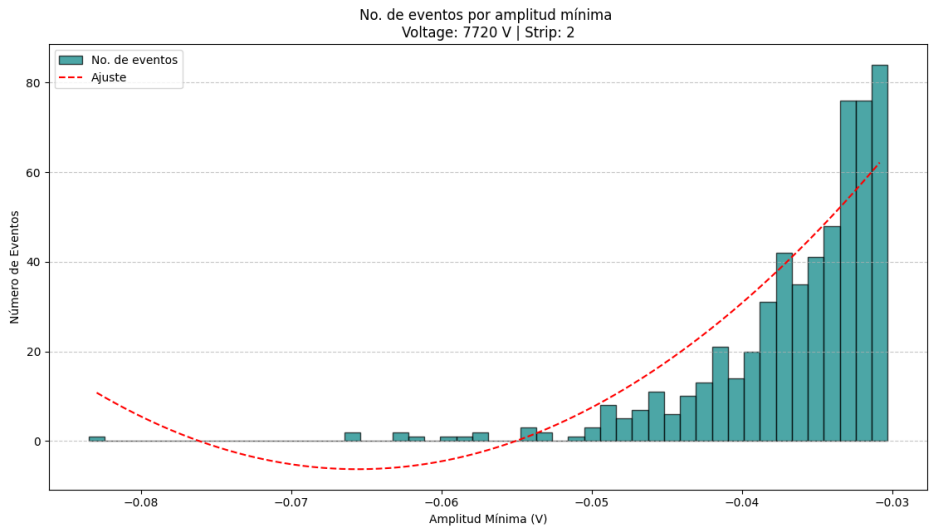


Figura 4.23: Eventos VS Amplitud, 7720 V, Strip 2.

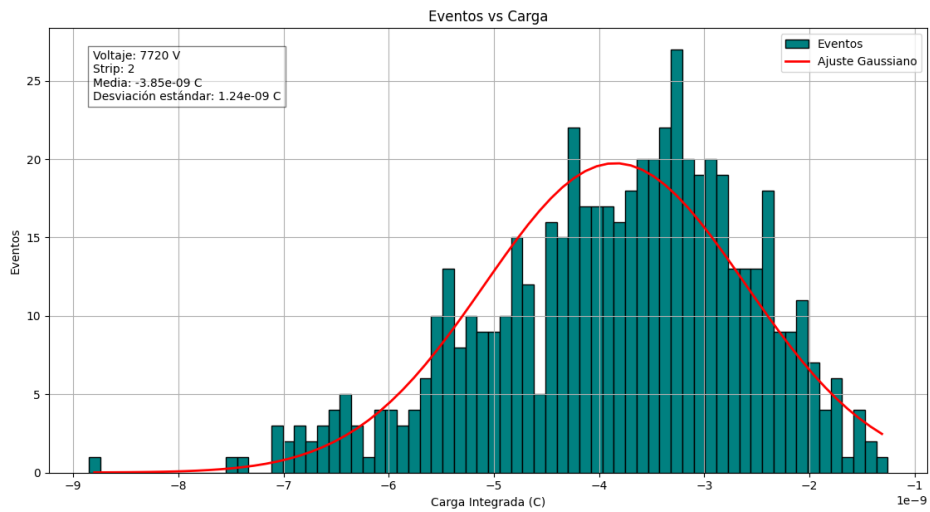


Figura 4.24: Eventos VS Carga, 7720 V, Strip 2.

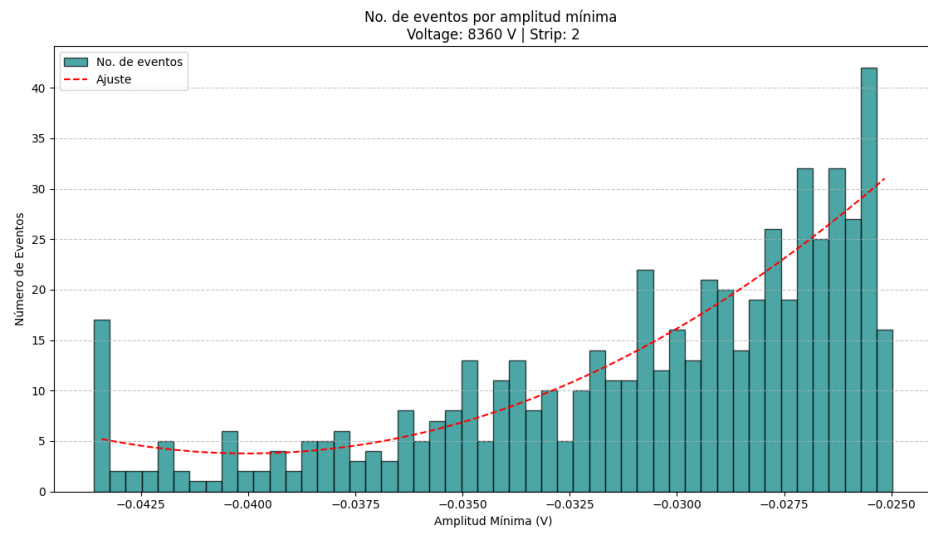


Figura 4.25: Eventos VS Amplitud, 8360 V, Strip 2.

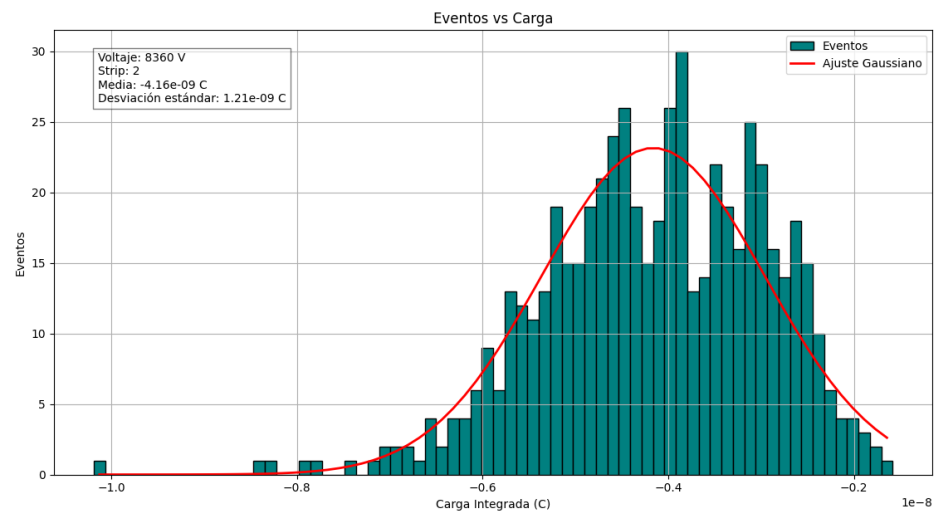


Figura 4.26: Eventos VS Carga, 8360 V, Strip 2.

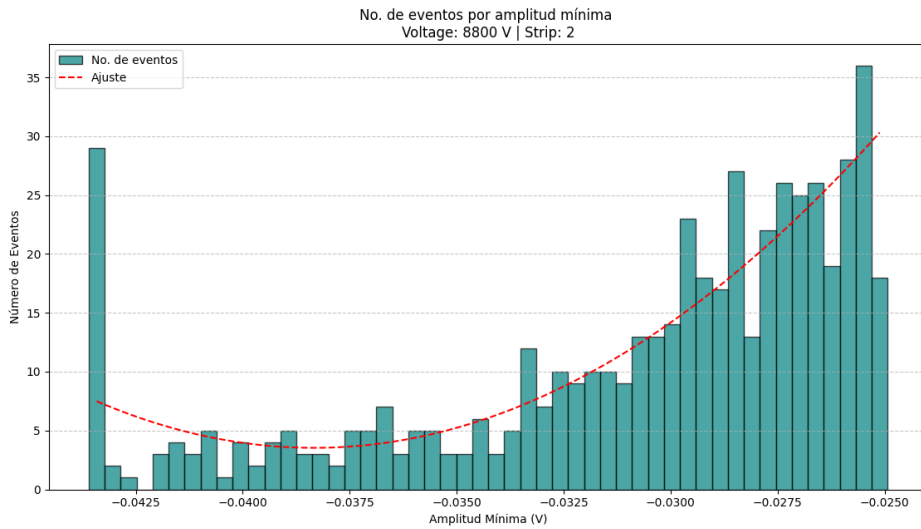


Figura 4.27: Eventos VS Amplitud, 8800 V, Strip 2.

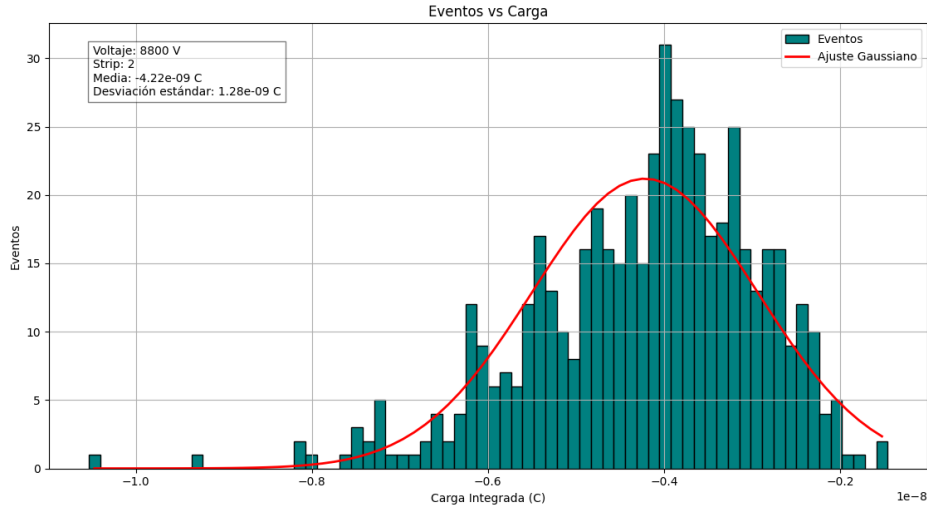


Figura 4.28: Eventos VS Carga, 8800 V, Strip 2.

El comportamiento de la RPC con distintos voltajes arroja resultados consistentes, puesto que tienen tendencias muy similares, lo cual puede confirmar el buen funcionamiento de la HVPS.

#### 4.0.6. Comparación con otros resultados

En esta sección se presentan los resultados de las mediciones realizadas con un RPC operado con gas freón, alimentado por una HVPS comercial. Cabe destacar que estas pruebas no fueron realizadas dentro de la presente investigación, sino que corresponden a estudios previos. No obstante, sus resultados sirven como referencia para comparar el desempeño de la fuente de alto voltaje

construida y evaluar su estabilidad en condiciones similares de operación.

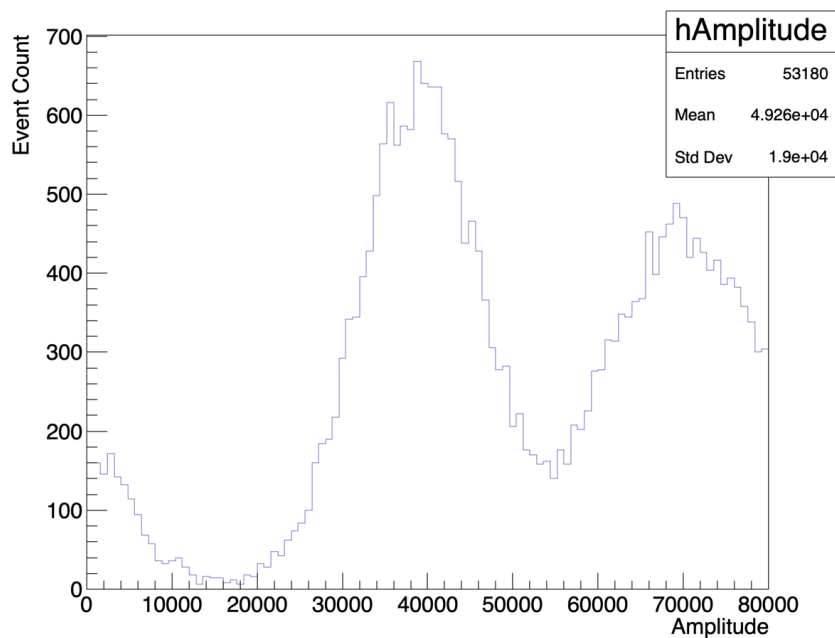


Figura 4.29: Número de eventos por amplitud.

En la figura 4.29 puede verse al principio una tendencia similar a la obtenida previamente.

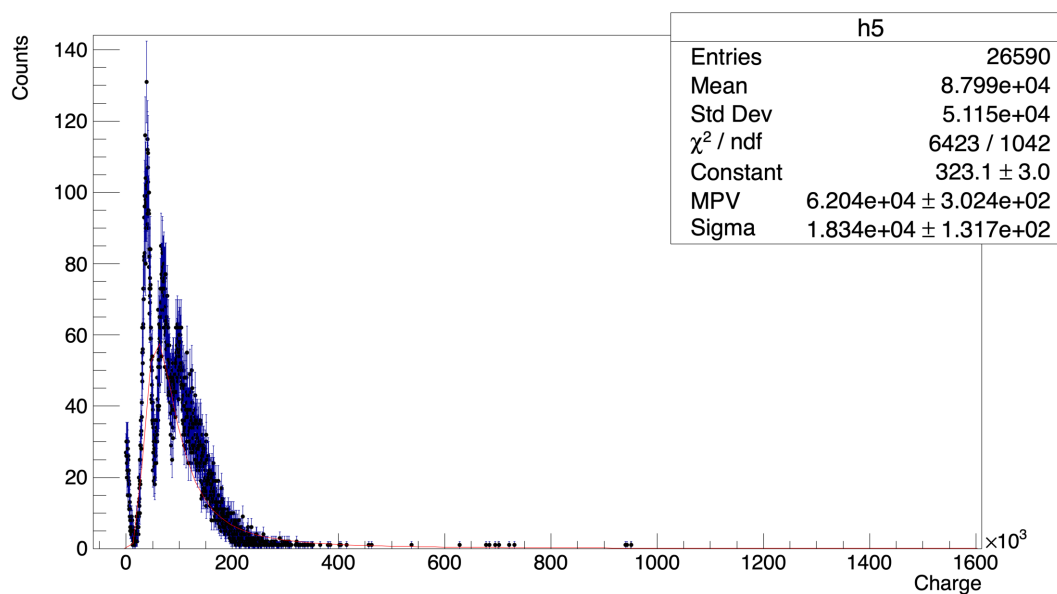


Figura 4.30: Número de eventos por carga.

Para el número de eventos por carga de la figura 4.30, hay una tendencia bastante similar a la que se obtuvo en la mayoría de mediciones obtenidas previamente.

Lo siguiente es una de las señales típicas obtenidas por medio del RPC, alimentada por la fuente construida durante esta investigación.

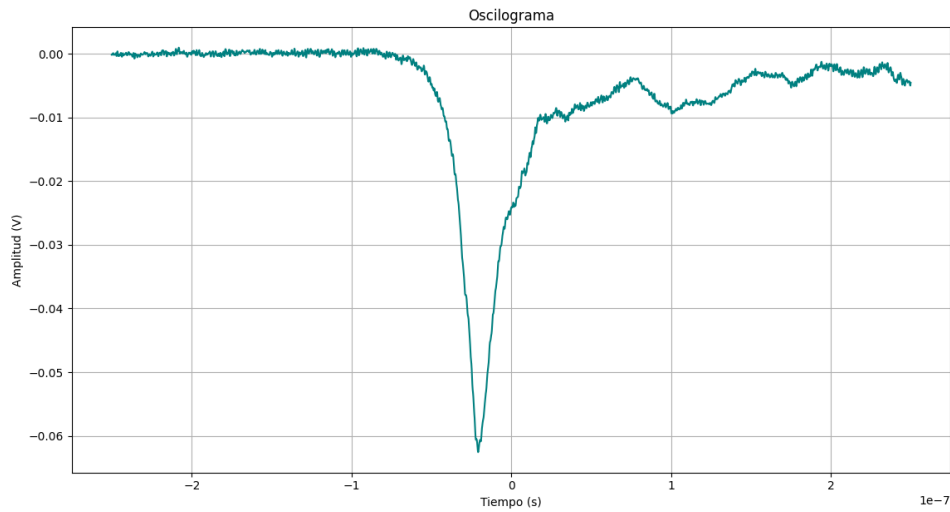


Figura 4.31: Señal típica producida por el paso de partículas cargadas.

A continuación se muestran las señales digitalizadas del RPC operado por la fuente comercial, su forma es similar a la mostrada en la figura 4.31.

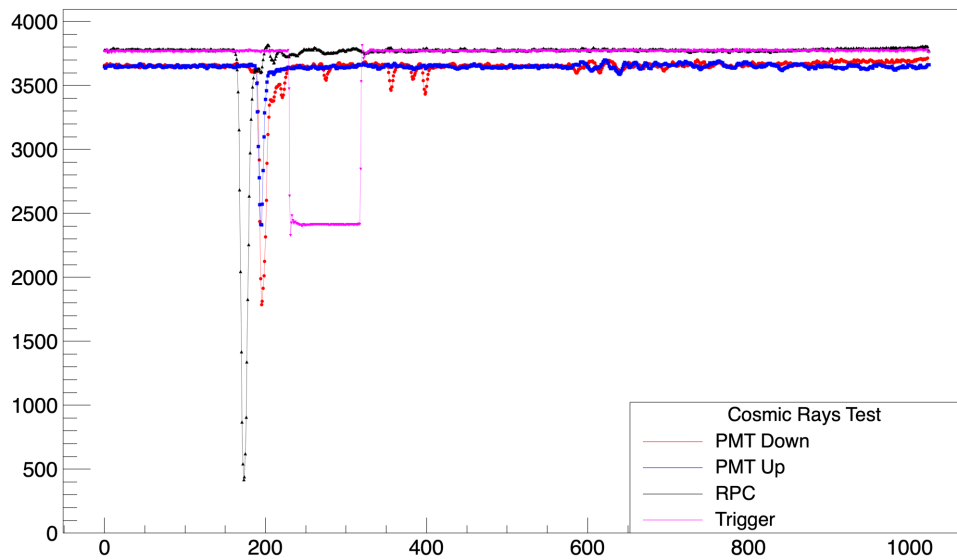


Figura 4.32: En negro está indicada la señal producida en el RPC.

La figura que se muestra a continuación combina todas las señales detectadas por el RPC del estudio previo.

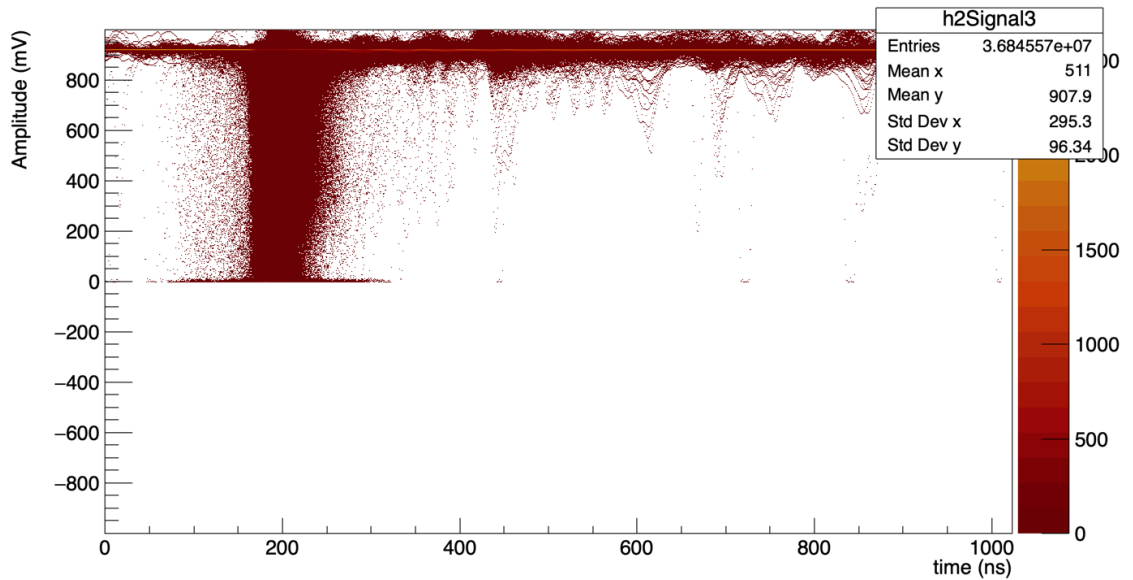


Figura 4.33: Señales combinadas del RPC.

En la figura 4.34 se muestran todas las señales combinadas de una de las mediciones obtenidas por medio del RPC de esta investigación

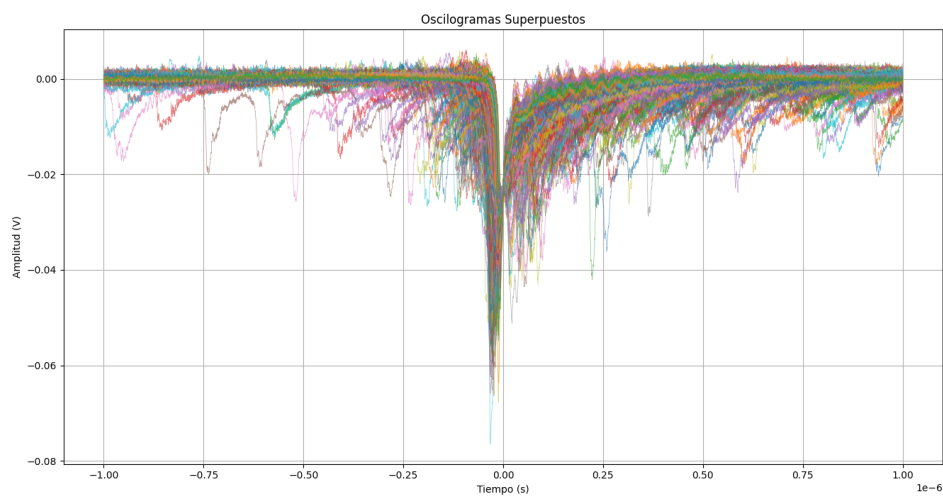


Figura 4.34: Todas las señales de una medición combinadas.

#### 4.0.7. Análisis de estabilidad del voltaje de la HVPS

En esta sección, se realizó un análisis del voltaje de salida del oscilador Royer, justo antes de la fase de multiplicación y rectificación. Se encendió la HVPS y se ajustó el voltaje al nivel más bajo posible, con el fin de realizar una medición segura. Los cables de medición del osciloscopio se conectaron a la salida del transformador del oscilador Royer.

Uno de los oscilogramas obtenidos es el de la figura 4.35, se marcan con puntos amarillos los picos máximos de voltaje. En este caso, se encontró que el tiempo entre picos es de  $0.000023s$ , y que la amplitud media máxima es de  $8.279614V$ . La desviación estándar de las amplitudes es de tan sólo  $0.007921V$ .

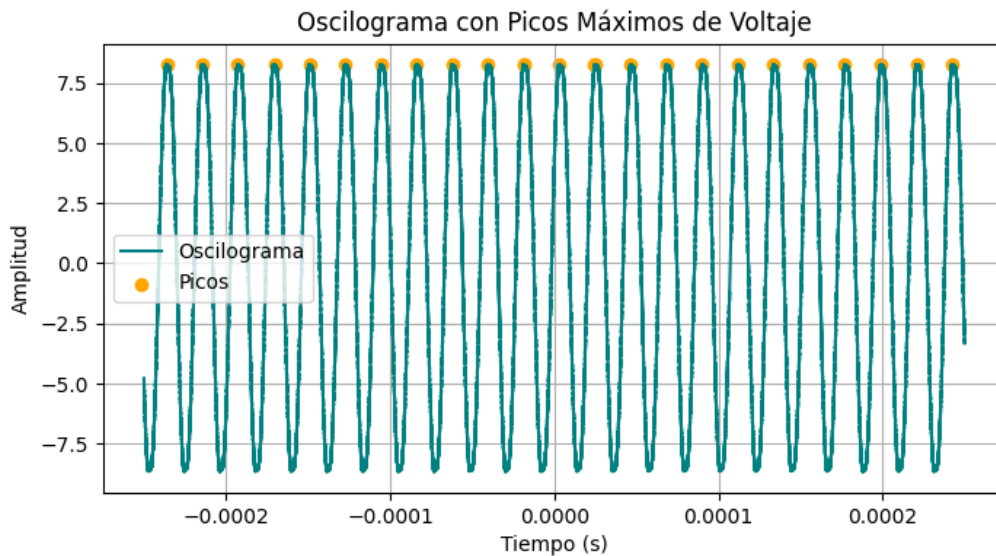


Figura 4.35: Oscilograma con picos máximos de voltaje.

Los resultados del análisis de los oscilogramas obtenidos se presentan en la siguiente tabla:

Amp. Mín. (V)	Amp. Max.(V)	Amp. media (V)	St. Dev (V)	Tiempo (s)
8.109350	8.162250	8.127851	0.009673	0.000022
8.456450	8.490430	8.470153	0.007955	0.000022
8.268750	8.302250	8.281660	0.006574	0.000022
8.243410	8.302610	8.267056	0.008853	0.000023
8.260500	8.292240	8.279614	0.007836	0.000023
8.235470	8.264160	8.251176	0.006918	0.000022
8.242190	8.281860	8.257921	0.008477	0.000023

Tabla 4.7: Relación entre amplitudes y tiempos entre picos.

Amp. Mín. (V)	Amp. Max. (V)	Amp. Media(V)	St. Dev.	Tiempo (s)
8.259446	8.299257	8.276347	0.008040	0.00002243

Tabla 4.8: Todos los datos presentados corresponden al promedio de los resultados en la tabla 4.7.

Con los datos obtenidos, se pueden hacer algunas observaciones sobre la estabilidad de la fuente de voltaje. La amplitud mínima y máxima varían en un rango estrecho, desde  $8.109V$  hasta  $8.456V$

para la mínima, y entre  $8.162\text{ V}$  y  $8.490\text{ V}$  para la máxima. Esta variación es pequeña, lo que sugiere que la HVPS es estable y no presenta grandes fluctuaciones. Los valores promedio de la amplitud también son consistentes, variando entre  $8.127\text{ V}$  y  $8.470\text{ V}$ , lo que refuerza la idea de una operación estable.

Los valores de desviación estándar del voltaje, que oscilan entre  $0.00657\text{ V}$  y  $0.00967\text{ V}$ , son muy pequeños, lo que indica que las fluctuaciones alrededor del promedio son mínimas. Esto confirma la estabilidad de la fuente, ya que no se observan picos abruptos ni caídas significativas.

Además, el tiempo entre picos se mantiene constante, entre  $0.000022\text{ s}$  y  $0.000023\text{ s}$ , lo que indica una frecuencia regular y la ausencia de señales de inestabilidad en la operación de la fuente.



# Capítulo 5

## Conclusiones

### 5.1. Síntesis de Resultados

En esta tesis se presentó el diseño, construcción y caracterización de una fuente de alimentación de alto voltaje (HVPS) destinada a su integración con una cámara de placas resistivas (RPC) para experimentos en física de partículas. El desarrollo experimental incluyó un proceso exhaustivo de verificación de estabilidad, eficiencia y capacidad de operación de la HVPS en condiciones de alto voltaje, así como su capacidad para producir señales confiables al interactuar con la RPC.

Uno de los principales logros fue la estabilidad de voltaje de la HVPS. Durante las pruebas, la HVPS mantuvo un voltaje de salida constante en un rango de operación de hasta 8800V en la integración con una RPC, sin presentar fluctuaciones significativas. Esto fue validado mediante el análisis estadístico de las amplitudes mínima y máxima de las señales registradas, así como por el bajo valor de las desviaciones estándar. Dichos resultados sugieren que el sistema es capaz de operar de manera segura y estable, lo cual es crucial para experimentos que requieren condiciones controladas y constantes de alto voltaje.

Se encontró que la relación entre el voltaje suministrado por la HVPS y las amplitudes mínimas promedio de las señales demostró un patrón estable y consistente en rangos superiores a 7700V. Esto indica que el prototipo de HVPS cumple satisfactoriamente con los requisitos de voltaje y precisión para las aplicaciones propuestas en este trabajo experimental, proporcionando una base sólida para el uso continuo del sistema en configuraciones de detección de partículas.

Además, al comparar los resultados obtenidos de un estudio previo con un RPC operado mediante una fuente de alto voltaje comercial, muestran patrones similares a los obtenidos con la fuente construida en esta investigación, y aunque en algunos casos presentan variaciones, estas se deben a que se usaron gases distintos en la operación del RPC correspondiente. Lo cual confirma la eficacia de la HVPS construida.

Por último, el costo aproximado de la fuente construida es de aproximadamente \$5000(250 USD), si bien, a pesar de aún carecer de un monitor para conocer el voltaje en tiempo real, una carcasa, y otros aditamentos adecuados para poder operarla de forma directa, su costo no se elevaría considerablemente. Por lo que representa una opción mucho más económica que las fuentes comerciales, cuyos costos, pueden ser superiores a los \$30000 (1500 USD).

### 5.2. Propuestas para trabajos futuros

A partir de los resultados obtenidos, se identificaron varias áreas de mejora para futuras versiones de la fuente de alto voltaje (HVPS), cuyo perfeccionamiento podría optimizar tanto su rendimiento como su estabilidad y seguridad en aplicaciones experimentales.

Una de las principales recomendaciones es asegurar la correcta conexión de los componentes durante la fase de diseño y construcción, lo cual evitará la necesidad de realizar cortes y puentes en las pistas del circuito impreso. Esto permitiría construir una fuente de mayor fiabilidad y reduciría los puntos de posibles fallas en las conexiones. Es recomendable revisar exhaustivamente el diseño de la PCB y verificar todas las conexiones antes de la fabricación de la placa para asegurar que las conexiones faltantes se integren desde el inicio, evitando la adición de puentes con cables.

Asimismo, se encontró que no todas las fases de multiplicación inicialmente propuestas son necesarias para alcanzar los niveles de voltaje requeridos en el experimento. Al emplear solo la mitad de las fases, es posible obtener un voltaje estable que incluso supera los  $10000V$ , lo cual libera espacio en el diseño de la PCB. Este espacio adicional podría aprovecharse para separar mejor las pistas de alto voltaje, reduciendo la probabilidad de formación de arcos eléctricos a altos voltajes. Esta modificación contribuiría a mejorar la seguridad y la durabilidad del sistema, especialmente en condiciones de operación prolongadas o de voltaje elevado. También puede usarse este espacio para añadir el divisor de voltaje que permita que la regulación del potenciómetro ocurra entre  $4V$  y  $5V$ .

En futuras versiones de la HVPS, sería recomendable el uso de resina aislante en lugar de silicón en las áreas de mayor voltaje. La resina aislante ofrece una alta impedancia, lo que reduce significativamente la posibilidad de formación de arcos eléctricos incluso bajo altos niveles de voltaje. Esta protección adicional no solo ayudaría a prolongar la vida útil de los componentes al minimizar el riesgo de daño por descargas eléctricas, sino que también mejora la seguridad del sistema. Al encapsular las partes críticas de la HVPS con resina, se reduce el riesgo de accidentes durante la manipulación, proporcionando una barrera de aislamiento más robusta y confiable frente a las condiciones extremas de operación del circuito.

## Apéndice A

# Esquemáticos de la fuente

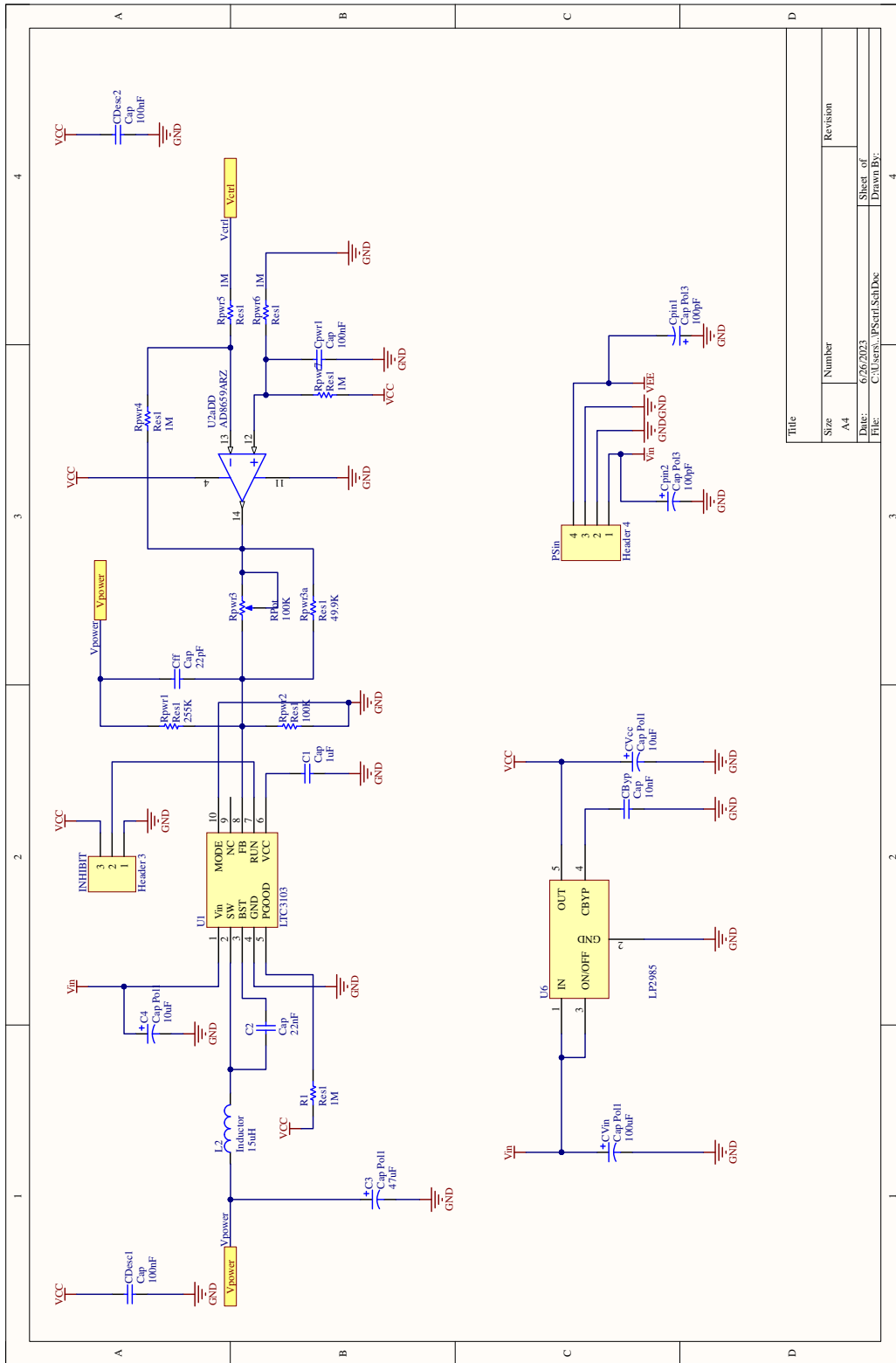


Figura A.1: Entrada de voltaje y parte de la regulación.

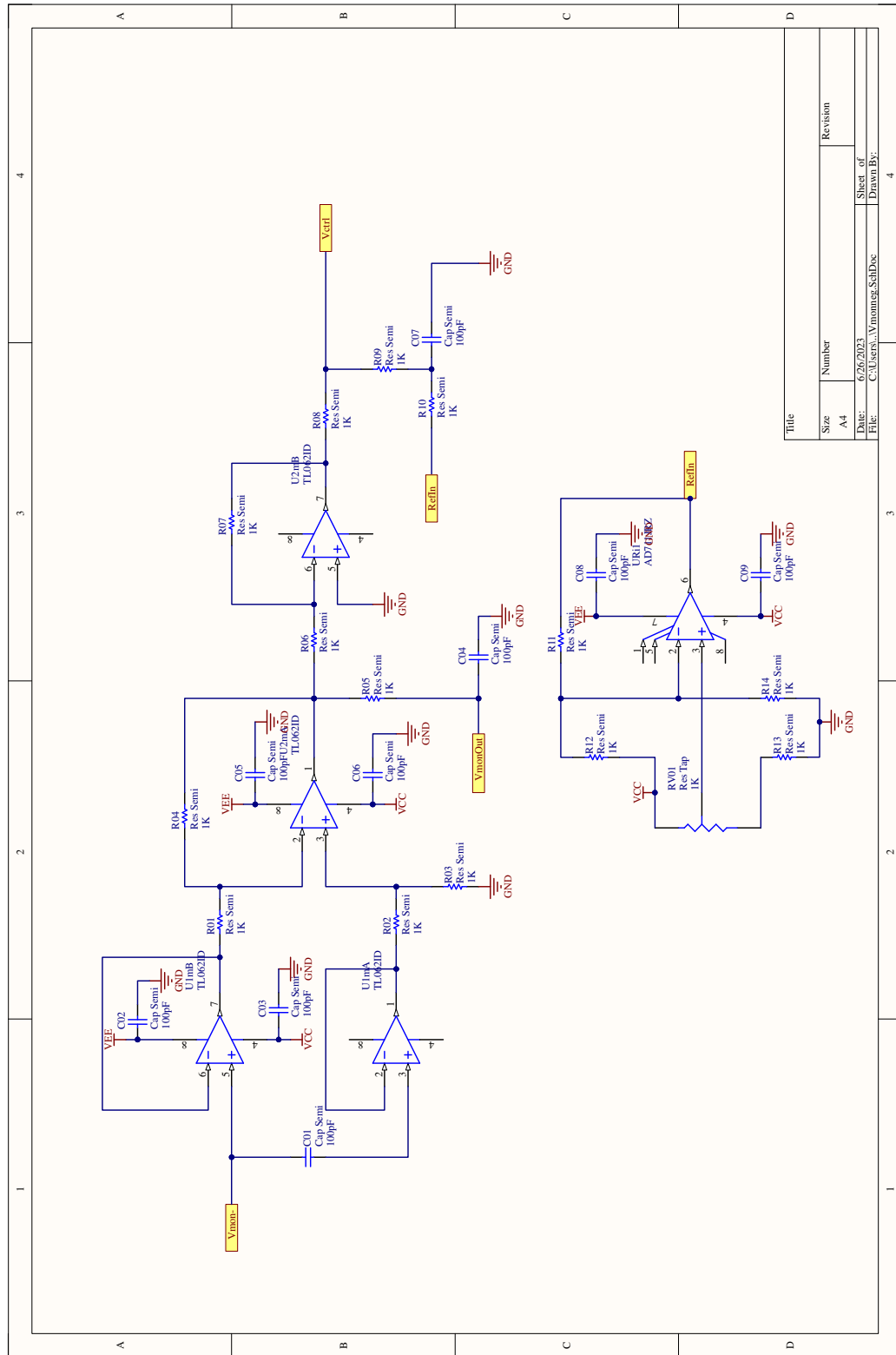
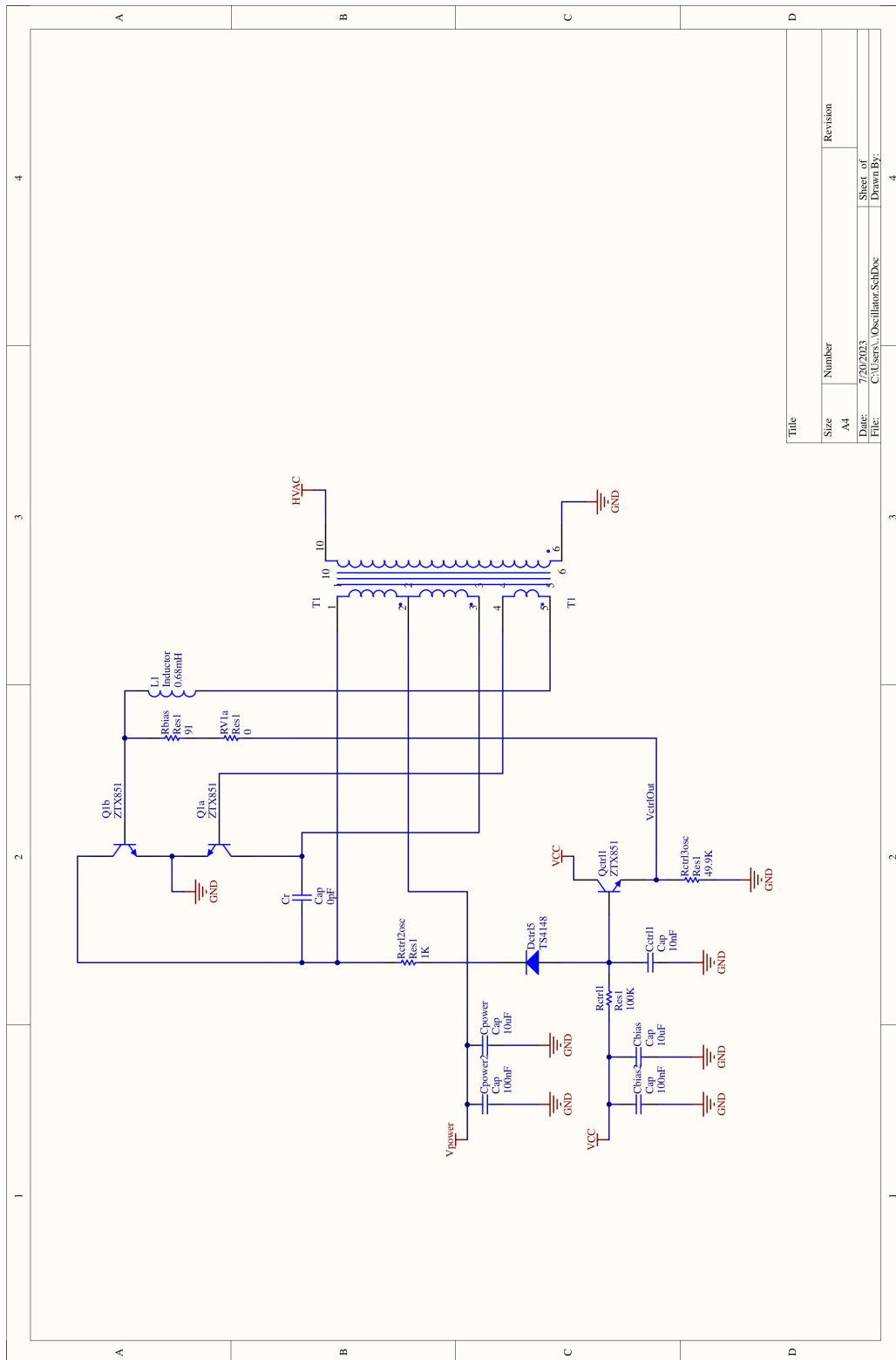


Figura A.2: Potenciometro regulador de voltaje, y parte de la regulación



Title	
Size	Number
A4	Revision
Date:	Sheet of
File:	Drawn By:
C:\Users\... OscillatorSchDoc	4

Figura A.3: Oscilador Royer

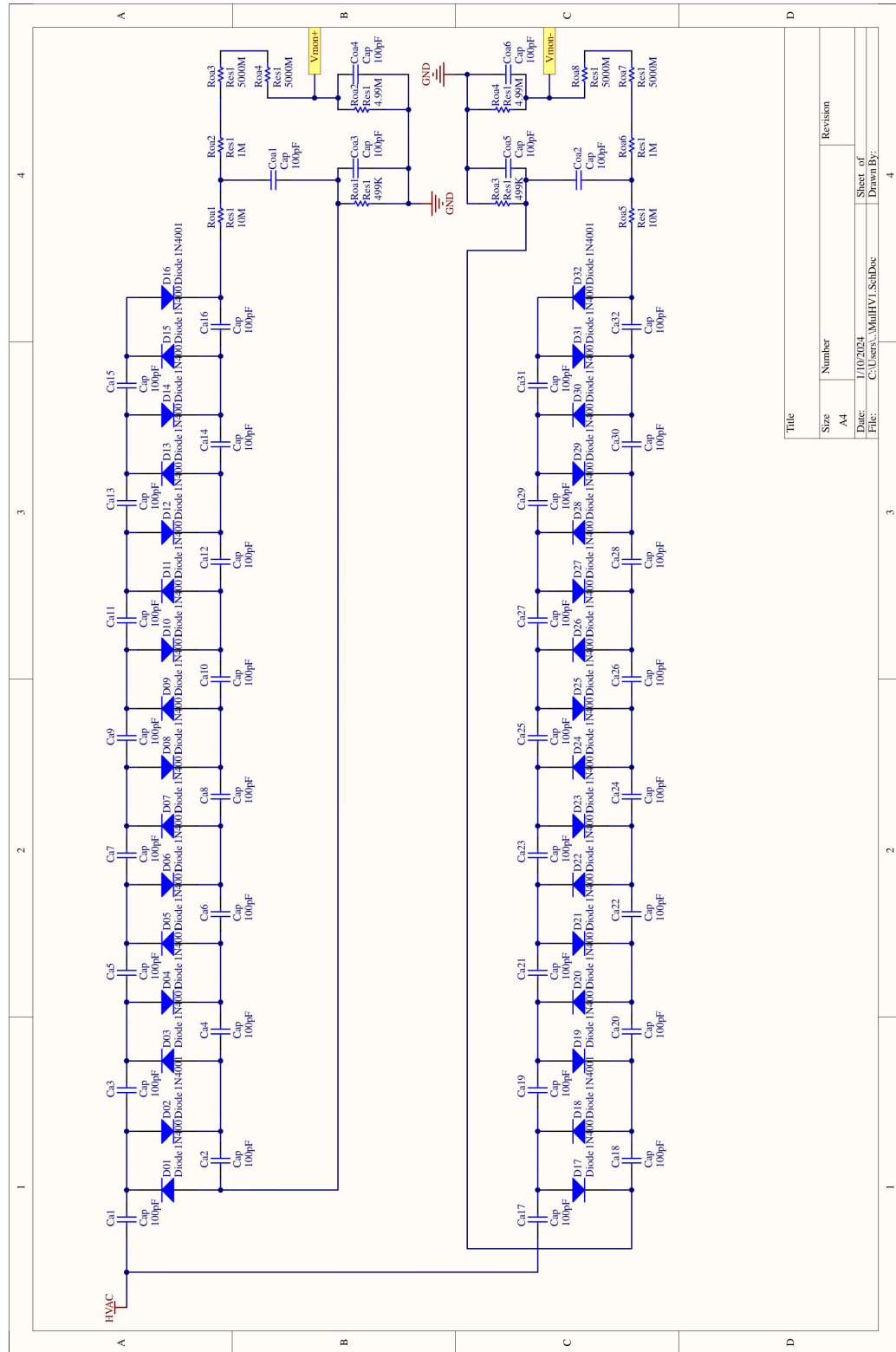


Figura A.4: Multiplicadores y divisores de voltaje



# Bibliografía

- [1] Marcello Abbrescia, Vladimir Peskov, and Paulo Fonte. *Resistive gaseous detectors: designs, performance, and perspectives*. John Wiley & Sons, 2018.
- [2] G Bencivenni, M D’Incecco, G Felici, C Gustavino, and E Iacuesssa. A modular design for glass spark counters. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 345(3):456–460, 1994.
- [3] Owen Bishop. *Electronics: a first course*. Routledge, 2010.
- [4] JS Brugler. Theoretical performance of voltage multiplier circuits. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 6(3):132–135, 1971.
- [5] R Cardarelli, V Makeev, and R Santonico. Avalanche and streamer mode operation of resistive plate chambers. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 382(3):470–474, 1996.
- [6] Richard Clinton Fernow. *Introduction to Experimental Particle Physics*. Cambridge University Press, 2023.
- [7] Stan Gibilisco and Simon Monk. *Teach Yourself Electricity and Electronics, Sixth Edition*. McGraw Hill Professional, 2016.
- [8] Paul Horowitz, Winfield Hill, and Ian Robinson. *The art of electronics*, volume 3. Cambridge university press Cambridge, 2015.
- [9] Glenn F Knoll. *Radiation detection and measurement*. John Wiley & Sons, 2010.
- [10] Christian Lippmann and Werner Riegler. Detector physics of resistive plate chambers. In *2002 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, volume 1, pages 600–604. IEEE, 2002.
- [11] George H Royer. A switching transistor dc to ac converter having an output frequency proportional to the dc input voltage. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part I: Communication and Electronics*, 74(3):322–326, 1955.
- [12] R Santonico and R Cardarelli. Development of resistive plate counters. *Nuclear Instruments and Methods in physics research*, 187(2-3):377–380, 1981.
- [13] Fabio Sauli. Gaseous radiation detectors: Fundamentals and applications (cambridge monographs on particle physics, nuclear physics and cosmology). *CERN Courier*, 2015.
- [14] R. L. Workman and Others. Review of Particle Physics. *PTEP*, 2022:083C01, 2022.