

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO



FACULTAD DE CIENCIAS



Diseño y caracterización de un prototipo plasma jet

Tesis que presenta:

JUAN CARLOS MARTÍNEZ LÓPEZ

Para obtener el título de:

LICENCIADO EN FÍSICA

Asesores de tesis:

DR. PEDRO GUILLERMO REYES ROMERO

DR. AARÓN GÓMEZ DÍAZ

Índice general

Resumen	7
Introducción	8
Justificación.....	10
Objetivo general.....	10
Objetivos específicos	10
Capítulo 1: Marco Teórico.....	11
1.1 Plasma	11
1.2 Clasificación	17
1.3 Descargas de Barrera Dieléctrica	18
1.4 Plasma jet	19
1.5 Diagnostico	22
1.5.1 Espectros Ópticos de Emisión	22
1.5.2 Corriente y voltaje.....	24
1.5.3 Potencia eléctrica.....	25
1.5.4 Divisor de voltaje.....	28
1.5.5 Voltaje en función de la frecuencia.....	30
1.5.6 FRF en un circuito en serie.....	30
1.5.7 Curvas de admitancia	32
Capitulo 2: Diseño Experimental	35
2.1 Desarrollo del mecanismo del jet	35
2.1.1 Sistema experimental	35
2.1.2 Diseño del plasma jet.....	37
2.1.3 Espectrómetro y fibra óptica	38
2.1.4 Fuente de voltaje (corriente y voltaje).....	40
2.1.5 Divisor de voltaje.....	43
2.1.6 Osciloscopio	45
2.1.7 Camara de Polymaq.....	46
2.1.8 Calibración de la salida del voltaje de la fuente.....	47
Capítulo 3: Resultados	49
3.1 Diagnóstico del voltaje	49
3.1.1 Calibración de la salida del voltaje de la fuente.....	49
3.1.2 Comportamiento de la fuente y sus puntos de resonancia	51
3.1.3 Comportamiento de la descarga y puntos de resonancia del jet.....	52
3.1.4 Comportamiento de la descarga y puntos de resonancia del jet con y sin electrodo externo.....	54

3.2 Diagnóstico de la corriente eléctrica del jet	55
3.2.1 Puntos de resonancia en la corriente	55
3.3 Diagnóstico de Espectros Ópticos de Emisión	56
3.3.1 Análisis de especies generadas en el jet por OES.....	56
3.3.2 OES en los puntos de resonancia	57
3.3.3 Espectros de emisión por cambio en el voltaje.....	57
3.3.4 OES del jet con una mezcla de Helio y aire	58
3.4 Diagnóstico en la dimensión del jet	59
3.4.1 Dimensión por cambio en el voltaje.	59
3.4.2 Dimensión del jet en función de la capacidad estructural del dispositivo por el aumento de voltaje.	61
3.4.3 Dimensión del jet en función de la variación de flujo de gas.....	61
3.5 Diagnóstico de la potencia eléctrica	62
3.5.1 Comparativa de las figuras de Lissajous para el dispositivo con y sin electrodo externo	62
3.5.2 Potencia eléctrica de acuerdo con el cambio en el flujo de gas	63
3.5.3 Potencia eléctrica de acuerdo con el cambio en el voltaje	64
Capítulo 4: Conclusiones	67
4.1 Referencias	72

Resumen

Las descargas de barrera dieléctrica (DBD) tienen muchas aplicaciones, y más aún cuando se trata de un dispositivo capaz de generar un plasma jet a presión atmosférica (APPJ, Atmospheric Pressure Plasma Jet por sus singlas en inglés). Esta tesis proporciona una descripción de los diagnósticos eléctricos para un APPJ, con un enfoque específico en la medición de parámetros como el voltaje, corriente, potencia eléctrica, espectros ópticos de emisión, flujo de gas Helio, longitud de la descarga y sus puntos de resonancia, para proporcionar información útil sobre el comportamiento del plasma y dar un análisis detallado de la construcción de un prototipo ajustable que optimice dichos parámetros. Tanto la configuración de medición eléctrica como la interpretación de los resultados del prototipo se comparan a profundidad. Las técnicas de diagnóstico se discuten para una variedad de aplicaciones, desde el tratamiento de enfermedades sistémicas, procesamiento de materiales, limpieza de superficies sin disolventes, descontaminación, entre otros.

Introducción

Los plasmas han sido estudiados varias décadas atrás por su interés en Física teórica y experimental, pues forman el noventa y nueve por ciento de la materia conocida en el universo; a pesar de ello, no parece lo suficientemente evidente la importancia que tiene, considerando únicamente eventos naturales que observamos a simple vista, como truenos en una tormenta o formación de auroras boreales en la termosfera, donde el cuarto estado de la materia se produce, no bastaría para compararlos con los múltiples sucesos producidos en las nebulosas gaseosas, esto es debido a la temperatura en la atmósfera terrestre y en general del planeta, al ser mucho más baja comparada con fenómenos del universo como el interior de nebulosas que presentan temperaturas de millones de grados.¹

A pesar de los pocos fenómenos que involucran el plasma de forma natural, el ser humano ha sido capaz de generarlos artificialmente para aprender de ello y poder producir un número importante de usos en la ciencia y en la industria, desarrollando tecnología de punta. Una de las formas de producción artificial de plasma es a través de una descarga eléctrica, por ejemplo, las descargas Townsend y microondas, por medio de haces de electrones, los cuales pueden ser a bajas energías y a bajas presiones; entre las más importantes, se encuentra la descarga de barrera dieléctrica (DBD) obtenida cuando un flujo de corriente eléctrica es obligado a pasar por un material dieléctrico situado entre dos conductores.

El uso de las DBD a bajas presiones varían en función de las necesidades de la aplicación, por ejemplo, si se necesita incidir la descarga sobre una película con un sustrato, se puede controlar la temperatura por debajo de los 150 °C para no dañarlas; en otros casos es posible generar altas concentraciones de especies reactivas que pueden grabar y depositar en películas delgadas con velocidades de 10 $\mu\text{m}/\text{min}$; sin embargo, la mayoría de estas opciones hace que operarlas a bajas presiones tenga sus inconvenientes, pues los sistemas de vacío son caros y requieren mantenimiento.² De ahí, surge el desarrollo de fuentes de plasma a presión atmosférica (APP por sus siglas en inglés Atmospheric Pressure Plasma) para reemplazar a los sistemas de vacío, siendo una tendencia actual en el área de medicina e ingeniería. Con este tipo de fuentes, la interacción entre la zona de producción del APP y las muestras a tratar no están sujetas al tamaño de un contenedor, otorgando un panorama mayor en el uso, además, si se trabaja con altas tasas de flujo de gas se logra expulsar el plasma lejos de la fuente de alimentación, dando como resultado de esta configuración experimental a presión atmosférica un jet de plasma.³

En el caso del plasma jet operado a bajas temperaturas se pueden dirigir el jet en todas direcciones del habitáculo que lo contiene a comparación de las descargas de barrera dieléctrica, además estos plasmas son fuentes únicas que proporcionan un volumen de plasma fuera de los límites de los electrodos y las cámaras que pudieran contener al gas de arrastre. Esta es una propiedad extremadamente atractiva para aplicaciones médicas donde el objetivo

suele ser un tejido biológico ubicado en condiciones normales y sin obstrucciones⁴. Este jet de plasma frío proporciona un modo eficaz de tratamiento para las infecciones por hongos de la piel, inclusive, los estudios en animales no muestran daños significativos en la misma⁵. También puede ser utilizado para el blanqueamiento dental que han mostrado ser más eficientes en comparación con métodos tradicionales con H₂O₂⁶. Además, los usos de APPJ pueden estar en áreas como biomédica, dermatológica, terapia médica, y mas aún, en la automotriz, desarrollando una ignición en el motor basado en el uso de bujías de plasma jet⁷.

Justificación

La utilización práctica de un prototipo con APPJ, se basa en las numerosas posibilidades de aplicación dado que se logra tener un mayor control en temperaturas bajas. Desarrollar un aparato para generar plasmas jet a presión atmosférica y con un tamaño considerable será un desafío, si se logran optimizar los parámetros se podrá llegar a una comprensión profunda de la interacción entre los componentes del plasma y el medio, generando trabajos posteriores con importantes aplicaciones, como el tratamiento de muchas enfermedades sistémicas, el procesamiento de materiales, la limpieza de superficies sin disolventes, descontaminación, entre otros.

Objetivo general

Construir un dispositivo capaz de generar un plasma jet, caracterizando las condiciones óptimas de voltaje, corriente, potencia eléctrica, flujo de gas Helio y de longitud de la descarga para poder desarrollar su aplicación.

Objetivos específicos

- * Diseño de un prototipo para producir un plasma jet a presión atmosférica.
- * Caracterización previa de una fuente DC pulsada eficiente para la aplicación en el APPJ.
- * Modelado y control del proceso de ignición del plasma.
- * Caracterización de resultados por Espectroscopia de Emisión Óptica.
- * Caracterización de potencia eléctrica relativa a la descarga eléctrica generada.

Capítulo 1: Marco Teórico

1.1 Plasma

Para comprender el funcionamiento del plasma se tomará en cuenta la descripción de los tres estados de agregación de la materia desde el punto de vista eléctrico, y así comprender la conducción de electrones ante una descarga eléctrica entre dos electrodos. Para el caso de un material sólido, el movimiento de los electrones estará regido por fundamentos Óhmicos que describen una dependencia lineal entre la diferencia de potencial aplicada entre los extremos del material, con una intensidad de corriente circulante y la resistencia en un circuito cerrado y aislado. En cuanto a los líquidos, específicamente las disoluciones acuosas, además del mismo fundamento que los materiales sólidos, estos presentarán dos tipos de conducción dependiendo si la mezcla contiene materiales ácidos o materiales metálicos, convirtiéndose en conductores iónicos o electrolíticos y conductores electrónicos respectivamente. En el caso de los gases, al ser no conductor, no estará regido por la Ley de Ohm, pero en cuanto se genere una diferencia de potencial entre los electrodos, los electrones libres se acelerarán alcanzando la suficiente energía como para colisionar entre sí, apareciendo una corriente eléctrica débil, si se continúa aumentando la diferencia de potencial añadiendo una presión baja, las especies en el gas se ionizarán y se liberarán más electrones¹⁴ produciendo un incremento brusco de la corriente, a éste fenómeno se le conoce como ruptura eléctrica, haciendo que el comportamiento del gas pase a ser conductor, lo que implica un paso de corriente eléctrica de forma elevada, ocasionando además, que en distintos espacios del gas aparezcan zonas emisoras de luz, apreciándose efectos visuales para el ojo humano conocidas como descargas luminiscentes. Es en este momento que el gas se convierte en el cuarto estado de la materia, el plasma.⁸

Una vez que se haya generado la corriente en el gas, la descarga dependerá de la diferencia de potencial, la forma y estructura de los electrodos, de la composición del gas, la presión, así mismo de su geometría, pues entre el espacio interelectródico existe transporte eléctrico y estos electrones serán acelerados por el campo existente, produciendo de manera interna sobre el gas una transición brusca a la ionización por la diferencia de potencial entre los electrodos. Estas interacciones conllevan a un proceso de excitación y desexcitación en los átomos del gas, dando lugar a la emisión de fotones.⁸

A esta mezcla de iones, fotones, y átomos, lo describió por primera vez en 1928 el inglés Irving Lagmuir, acuñando el término de plasma, compuesto además por electrones, neutrones, protones y radiación electromagnética con características de un gas ionizado de forma cuasi neutral,⁹ es decir, hay un número igual de cargas positivas y negativas en todo el gas.

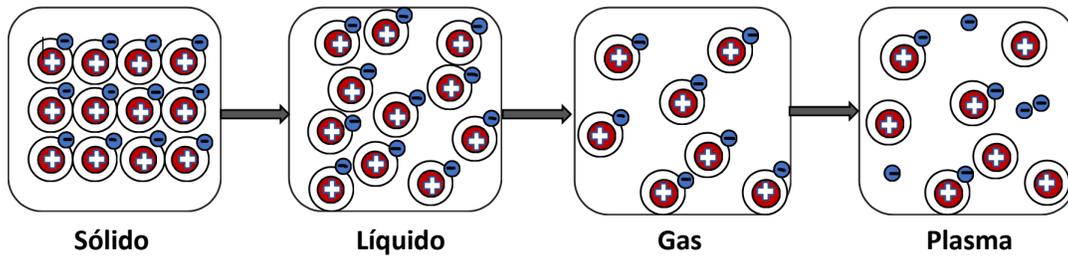


Figura 1: Esquema del cambio en los estados de agregación de la materia.

Regularmente los fluidos como los gases tienen partículas que se encuentran originalmente en equilibrio térmico, lo que implica que la distribución de la velocidad de las moléculas tiene un comportamiento maxwelliano, y en el caso que se considere una velocidad media para las moléculas, y que estas, tengan una velocidad muy cercana a la misma, como lo hizo Maxwell, se podría aplicar la probabilidad para describir las velocidades de las moléculas en un gas que se distribuyen sobre todos los valores posibles.



Figura 2: Esquema de distribución de partículas. a) Vista radial desde un átomo, b) gráfica del número de moléculas para un átomo, c) incremento en el número de átomos.

Suponiendo que las partículas de un átomo están descritas como en el inciso a) de la figura 2, algunas de ellas estarían más cerca del centro y otras mucho más lejos del mismo ocasionando que algunas de las moléculas se estén moviendo muy rápido, algunas muy lento y otras apenas se moverán, y si se contara el número de partículas diseminadas a diferentes distancias del centro o con distintas velocidades se puede construir una gráfica como la que se presenta en b), si se repitiera el experimento pero para un número mucho mayor de moléculas, se obtiene una distribución como la de c). En el límite, para un número extremadamente grande de moléculas habría un número significativo de los mismos prácticamente para cualquier distancia que se pudiera medir, y la gráfica mostraría la

distribución de las velocidades moleculares de forma continua como sucede en el interior del gas al tener también una alta cifra de partículas, mostrado en la figura 3, el cual describe las velocidades de las moléculas del gas determinadas por el movimiento que tienen entre sí.¹⁰

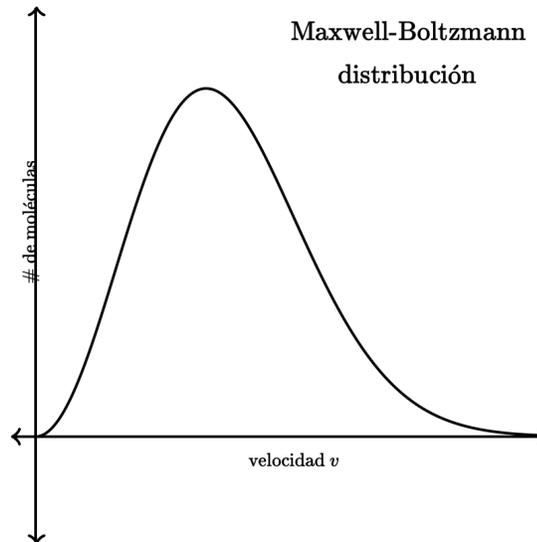


Figura 3: Campana Gaussiana producida por una distribución Maxwell-Boltzmann

Esta función de distribución de Maxwell-Boltzmann es descrita por la ecuación (1).

$$f(v) = Ae^{-\left(\frac{mv^2}{2k_B T}\right)} \quad \text{ecuación (1)}$$

Donde:

$$A = 4\pi v^2 \sqrt{\left(\frac{m}{2\pi k_B T}\right)^3} \text{ como el factor de normalización.}$$

$k_B \approx 1.38 \times 10^{-23} \frac{J}{K}$, la constante de Boltzmann.

T la temperatura.

m la masa.

v como la velocidad de las partículas.¹¹

Con esta distribución sería factible poder describir el comportamiento del plasma, pues es un gas al que se le podría calcular una variable única de temperatura por medio de la energía media del sistema en función de sus componentes y la distribución maxwelliana sería capaz de adecuarse como ocurre en la teoría cinética para gases no ionizados. Sin embargo, el

plasma si es un gas ionizado, y se debe analizar por separado las distintas especies de partículas de un solo tipo de átomo:

T_i : temperatura iónica

T_e : temperatura de los electrones

T_n : temperaturas de las partículas neutras

Se consideran estos tres subsistemas porque no están en equilibrio termodinámico entre sí, pues los electrones libres que lo contienen colisionan con otras especies producen más ionización entre las partículas, y generan que más electrones disponibles provoquen nuevas ionizaciones, estos electrones también provocan choques elásticos entre ellos, y al suceder de manera más frecuente que las especies ionizadas logran alcanzar una temperatura muy alta como para diferenciar a las partículas en conjuntos dentro del plasma, dichos electrones, y las partículas más pesadas que se quedan cerca de tener la temperatura ambiente.

Para el caso específico de los gases a presión atmosférica, estas tres especies no colisionan lo suficiente por su densidad, provocando que la temperatura no esté equilibrada. A pesar de ello, las partículas de la misma especie colisionan entre sí, provocando un estado termodinámico local (LTE), lo cual es suficiente para describir el comportamiento mediante una distribución maxwelliana de forma independiente, El concepto de estado termodinámico local es importante en la Física del plasma, ya que los plasmas son sistemas altamente no lineales y pueden tener propiedades termodinámicas que varían ampliamente en el espacio y en el tiempo. Por lo tanto, es necesario considerar y describir los estados termodinámicos locales para comprender adecuadamente la dinámica y la evolución del plasma..¹²

Para ello, es importante dar una descripción estadística completa de la función de distribución (f) con un número promedio de partículas “ j ”, teniendo:

$$f_j(x, v, t) d^3v d^3x \quad \text{ecuación (2)}$$

Donde d^3x el elemento de volumen y d^3v la velocidad de cada elemento. Dicha función de distribución del plasma es una descripción matemática de la distribución de energía de las partículas cargadas en un plasma y describe la probabilidad de encontrar una partícula cargada en un determinado estado de energía.

Es fundamental tener en cuenta que la función de distribución del plasma es una representación estadística y no brinda información sobre el movimiento individual de cada partícula en el plasma. En cambio, describe la distribución de energía y posición de un gran número de partículas cargadas en el plasma. La representación de la función de distribución con tensores es una forma eficaz de describir matemáticamente la distribución de partículas en el espacio y el tiempo, ya que los tensores permiten describir relaciones matemáticas que

involucran múltiples direcciones y magnitudes, como la posición, el momento y la energía de las partículas.

Si se considera una situación homogénea y consistente en el tiempo, de modo que para una sola especie de partículas que dependa de su velocidad " v ", se construirá el momento k –ésimo de la distribución:

$$M^k = \int f(v)(v)^k d^3v \quad \text{ecuación (3)}$$

Dicho momento, se refiere a la k -ésima integral de la función de distribución con respecto a las coordenadas de la posición de las partículas. Es una medida de la concentración de partículas cargadas en una región determinada del espacio, permitiendo describir la concentración de partículas en una región específica y su evolución en el tiempo.

Para realizar dicha descripción, se tiene el tensor de orden cero de la función de distribución del plasma, el cual es una representación que describe la densidad de partículas cargadas en el plasma. Este tensor se obtiene integrando la función de distribución sobre el espacio de momento para cada especie de partícula cargada en el plasma.

Para $k = 0$, se encuentra el momento escalar:

$$M^0 = \int f(v)d^3v = n \quad \text{ecuación (4)}$$

que describe la densidad de partículas n . El tensor se representa comúnmente como una matriz en la que cada elemento representa la densidad de partículas cargadas en un punto determinado en el espacio. La matriz puede describir la distribución de partículas cargadas en un punto específico en el tiempo o en un momento determinado, y es importante porque describe la densidad de partículas cargadas en el plasma, que a su vez es un factor clave en la dinámica y la evolución de este.

Para $k = 1$ el momento vectorial:

$$\frac{1}{n}M^1 = \frac{1}{n} \int f(v)v d^3v = \bar{v} \quad \text{ecuación (5)}$$

utilizado para encontrar la velocidad media de las partículas \bar{v} , donde $f(v)d^3v$ representa la densidad de partículas en el espacio y v la velocidad en una dirección. Este momento se refiere a la primera derivada de la función de distribución con respecto a las coordenadas de la posición de las partículas. Se puede entender como una medida de la densidad de corriente de partículas en el espacio. El momento 1-ésimo describe la cantidad de partículas que se mueven a través de una región específica del espacio en un instante determinado, por ejemplo, en una dirección específica puede dar la distribución promedio de la velocidad en una sola dirección.

Para $k = 2$, el momento de segundo orden:

$$m \int (v - \bar{v})(v - \bar{v})f(v)d^3v \equiv P \quad \text{ecuación (6)}$$

Si bien, el momento 2-ésimo de la función de distribución del plasma describe la distribución de la energía cinética en el plasma, este puede ser utilizado para calcular la presión en un plasma a través de la utilización de la teoría cinética. En la teoría cinética, la presión en un sistema de partículas cargadas se puede calcular a partir de la energía cinética media de las partículas. La energía cinética media de las partículas en un plasma se puede relacionar con el momento 2-ésimo de la función de distribución a través de una integral y una relación como la ecuación (6), donde P se define como el tensor de presión, y si se considera a la función de distribución como isotrópica, es decir, que tenga la misma forma y propiedades en todas las direcciones y que no varíe con la orientación, entonces se puede obtener la temperatura T :

$$T \equiv \frac{P}{n} \quad \text{ecuación (7)}$$

La temperatura utiliza nuevamente el concepto del tensor de presión P , por lo que se puede considerar también como un tensor de segundo orden que describe la relación entre la energía cinética y la dirección de las partículas por medio de una matriz de 3x3 que presenta la distribución de temperatura en tres direcciones espaciales.

Finalmente, para $k=3$, describe la distribución de la tercera componente del momento lineal de las partículas cargadas en el plasma:

$$m \int (v - \bar{v})(v - \bar{v})(v - \bar{v})f(v)d^3v = Q \quad \text{ecuación (8)}$$

Este momento tercero proporciona información sobre la cantidad de partículas cargadas que se encuentran moviéndose en una dirección determinada en el espacio y describe la cantidad de energía cinética que las partículas cargadas en el plasma tienen en función de su velocidad. Al integrar sobre todas las velocidades, se obtiene la cantidad total de energía cinética en el plasma, que es igual a la cantidad total de calor Q , y en la ecuación (8) dicha variable es el tensor del flujo de calor.

Se pueden tomar momentos para cada especie por separado, evaluando distintas densidades, temperaturas, etc, obteniendo así una descripción de múltiples fluidos, de las especies neutras, cargadas y electrones; y ya que éstas se encuentran acopladas por fuerzas electromagnéticas, reducirán la independencia de los momentos.

La medición de estos parámetros de momento, densidad del gas, presión y flujo de calor, debe ser suficiente para proporcionar una descripción completa del plasma, siempre y cuando éste se encuentre en un LTE, gracias a eso también se corrobora que el uso de la distribución (ecuación 2) sea del tipo maxwelliana.¹³

Debido a estas diferentes características del plasma, se genera información suficiente para categorizar los parámetros que ofrece dicho gas ionizado, como: intervalo de densidades, temperaturas, dimensiones, métodos de calentamiento y variedad de especies presentes. Y gracias a las variaciones en la función de distribución del plasma, puede dar una descripción de las partículas cargadas que los constituyen y hacer una clasificación para entender las propiedades físicas y dinámicas de los diferentes tipos de plasma desde diferentes puntos de vista, como lo es la física estadística.¹³

1.2 Clasificación

Para adentrarse en la producción del plasma de forma artificial, se deben considerar cuales de los parámetros que se pueden alterar influyen a un gas para convertirlo en plasma, pues muchas veces las influencias externas no son suficientes para producirlo o sostenerlo.¹

El plasma es el cuarto estado de la materia precedido por el gaseoso, líquido y sólido, para pasar entre ellos es necesario aportar energía y aumentar la temperatura, éstos son los principales parámetros por considerar además de la presión. Estos factores, de acuerdo con las estimaciones realizadas, pueden alcanzar medidas muy altas o, por el contrario, imprescindiblemente bajas, pudiéndose diferenciar por la energía media de las partículas que contienen, clasificando así al plasma por su temperatura electrónica y también por su grado de ionización. En esta clasificación se encuentran los plasmas calientes y los plasmas fríos, estos últimos son llamados así porque, como cualquier gas encontrado de forma natural en la Tierra, se ven provistos de cargas libres producidas por la ionización a causa de la radiación y sus partículas más pesadas que se quedan cerca de tener la temperatura ambiente, la cual es apenas de unos cuantos grados en la atmósfera terrestre y es prácticamente fría, comparada por ejemplo con los plasmas de fusión termonuclear que alcanzan temperaturas de hasta $10^8 K$, siendo este un ejemplo de plasma caliente.¹⁴

Gracias a la temperatura y a que siempre habrá una descarga de gas presente, se diferencian tres especies generadas principalmente tras la descarga: los electrones, las partículas del gas ionizado y las partículas del gas excitado, cada una de ellas con una temperatura independiente, y por lo tanto también con energía cinética promedio diferenciable dadas por la ecuación:

$$E = k_B T \quad \text{ecuación (9)}$$

Donde $k_B \approx 1.38 \times 10^{-23} \frac{J}{K}$ es la constante de Boltzmann y T la temperatura medida en K ; por ello la temperatura juega un papel importante en la clasificación del plasma al calcular la energía de las principales partículas dentro del gas. Basados en esta cuantificación es que se catalogan a las descargas de gas en dos configuraciones, los plasmas térmicos o calientes con

electrones en equilibrio y alto grado de ionizaciones, y los plasmas no térmicos o fríos con descargas a baja temperatura que no están en equilibrio. A pesar de estas características complejas y con muchos ordenes de magnitud la física aplicada como base es la misma para todas las clasificaciones de plasma.¹⁵ Sin embargo, átomos y moléculas pueden ionizarse también por impacto electrónico, absorción de fotones, reacciones químicas o nucleares, u otros procesos.

Plasmas térmicos

Este tipo de descargas generalmente están en equilibrio, pues la temperatura de los electrones, las partículas del gas (neutrones) y los iones están en equilibrio (con temperaturas $T_e \approx T_n \approx T_i \approx 10^4 K$ o más, respectivamente). Como principal ejemplo están las descargas de arco. También suelen producirse con presiones de 10^5 a 10^{12} bar como pasa en el interior de las estrellas.

Plasmas no térmicos

Estas descargas de gas tienen una más que notable diferencia en la temperatura de los electrones ($T_e \approx 10^4 K$) acercándose a la temperatura ambiente y, las partículas del gas neutras e iones ($T_n \approx T_i \approx 10^2 - 10^3 K$ respectivamente). Algunos ejemplos incluyen descargas de radiofrecuencia (RF), descargas luminosas (glow discharges), descargas de corona y descargas de barrera dieléctrica (DBD).¹⁵

1.3 Descargas de Barrera Dieléctrica

Una vez que se produce la descarga de un gas, las partículas cargadas se mueven bajo la influencia de un campo eléctrico o magnético, dependiendo de cómo es que dichos campos se produzcan es que generamos diferentes tipos de descarga. Si se aplica un campo eléctrico estático entre dos o más electrodos se estaría hablando de una descarga con corriente continua (CC), mientras que si el campo eléctrico es producido de forma periódica pero inestable, también entre electrodos metálicos, pudiendo o no estar cubiertos de material dieléctrico aislante, entonces se trataría de una descarga con corriente alterna (CA), siendo uno de los usos más comunes las descargas de barrera dieléctrica (DBD) generalmente con campos eléctricos de CA sinusoidales.¹⁵

De forma general, el comportamiento de una DBD implica que uno o ambos electrodos están cubiertos por material dieléctrico y, tras la ruptura del gas en el espacio, esta capa dieléctrica sirve para evitar la transición a una descarga de alta corriente en forma de arco que de otro modo ocurriría entre dos electrodos metálicos descubiertos, pues más bien, DBD sería una serie múltiple de arcos de micro descargas de corta duración con una corriente limitada. Su

principal característica es que se puede lograr una condición de plasma de equilibrio no térmico de una manera mucho más sencilla en comparación con otras alternativas; aunque no es del todo continuo u homogéneo y a veces los sustratos a tratar en dicha descarga sufren daños locales por las descargas de corta duración, su configuración geométrica, el medio de operación y la configuración de parámetros logran que DBD tenga ventajas importantes cuando se trabaja a presión atmosférica ¹⁶. La figura 4 muestra un esquema básico de cómo generar estas descargas con una configuración coaxial.

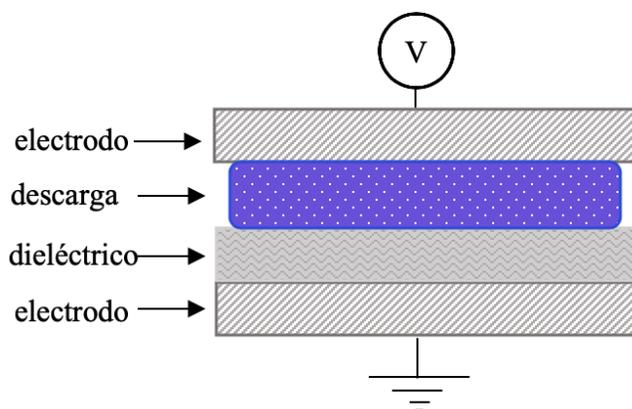


Figura 4: Esquema de un DBD con un electrodo cubierto por un dieléctrico

El espacio de trabajo a menudo está limitado debido a la pequeña brecha entre los electrodos, siendo uno de los principales problemas con estos sistemas (Figura 4). Si bien, aunque las DBD pueden trabajar a bajas presiones, la configuración del sistema se puede modificar para trabajar a presión atmosférica, con este confinamiento se ha reportado un “jet” de plasma producido durante el experimento en una composición DBD a presión atmosférica¹⁷.

1.4 Plasma jet

Para generar un plasma, se debe exceder el voltaje de ruptura V_b del gas, utilizando una configuración como la siguiente figura:

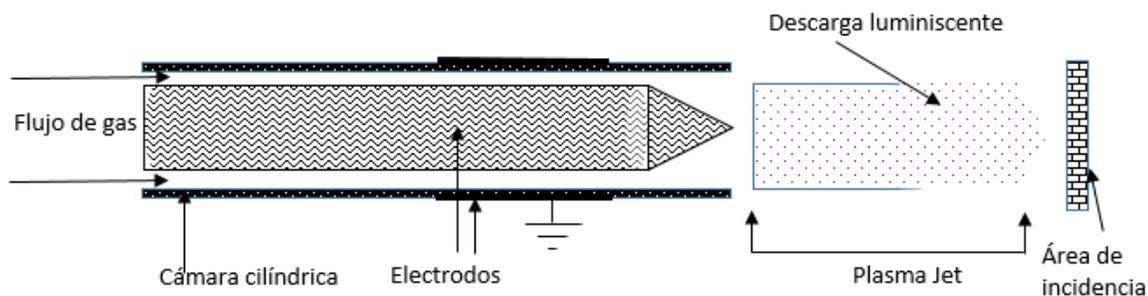


Figura 5: Configuración de una fuente Plasma Jet

El cual está en función de la separación d de los electrodos y de la presión P del gas dentro del tubo, principalmente se expresa de la siguiente manera¹⁷:

$$V_b = f(Pd) \quad \text{Ecuación (10)}$$

La ecuación anterior se conoce como la ley de Paschen, donde el voltaje V_b varía experimentalmente a lo largo de la descarga. Si ingresamos los parámetros A, B , los cuales dependen de la composición del gas y al coeficiente de emisión de los electrones secundarios del cátodo γ_{se} la ecuación anterior se convierte en¹⁶:

$$V_b = \frac{A (P d)}{\ln(P d) + B} \quad \text{Ecuación (11)}$$

Sí sustituimos $A = \frac{V_i}{P}$, $B = -\ln (P \ln (1 + \gamma_{se}))$, entonces:

$$V_b = \frac{B(p d)}{\ln[A(p d)] - \ln[\ln (1 + \frac{1}{\gamma_{se}})]} \quad \text{Ecuación (12)}$$

En comparación con las descargas de corriente directa (DC) donde si se logra reducir la distancia entre los electrodos y la presión se mantiene constante, la mayor parte de la distancia entre los electrodos será absorbida por la “columna positiva” de la descarga logrando un plasma estable y homogéneo, siendo un reto conseguirlo en una fuente APPJ como toda variación de la DBD, pues esta columna positiva constituye lo que llamamos plasma al ser un gas ionizado sin carga en el espacio neto¹⁷.

La comprensión del funcionamiento de un plasma se reduce a partir de la dependencia del voltaje y la corriente. Pues de acuerdo con la ecuación (12), el rompimiento en el voltaje de una fuente¹⁶ se expresa en la Tabla 1:

Fuente	$V_b(kV)$
Descargas de baja presión	0.2-0.8
Arcos de plasma	10-50
Corona	10-50
Descargas de barrera directa	5-25

Tabla 1: Ruptura del Voltaje en descargas de Plasma.¹⁶

Se observa que la DBD tiene uno de los rompimientos en el voltaje considerablemente más bajos en confrontación con otras fuentes. Funciona del mismo modo si hacemos una comparación con la densidad de carga electrónica generada a partir de distintas fuentes:

<i>Fuente</i>	<i>Densidad del plasma (cm⁻³)</i>
Descargas de baja presión	10 ⁸ – 10 ¹³
Arcos de plasma	10 ¹⁶ – 10 ¹⁹
Corona	10 ⁹ – 10 ¹³
Descargas de barrera directa	10 ¹² – 10 ¹⁵
Plasma Jet	10 ¹¹ – 10 ¹²

Tabla 2: Densidades de especies de carga generadas en la descarga de Plasma.¹⁸

De acuerdo con la tabla 2 se puede estimar que la energía de los electrones ronda entre 1eV gracias a su relación con la densidad, y ésta a su vez con su dependencia de la temperatura, teniendo la suficiente energía como para disociar moléculas¹⁸.

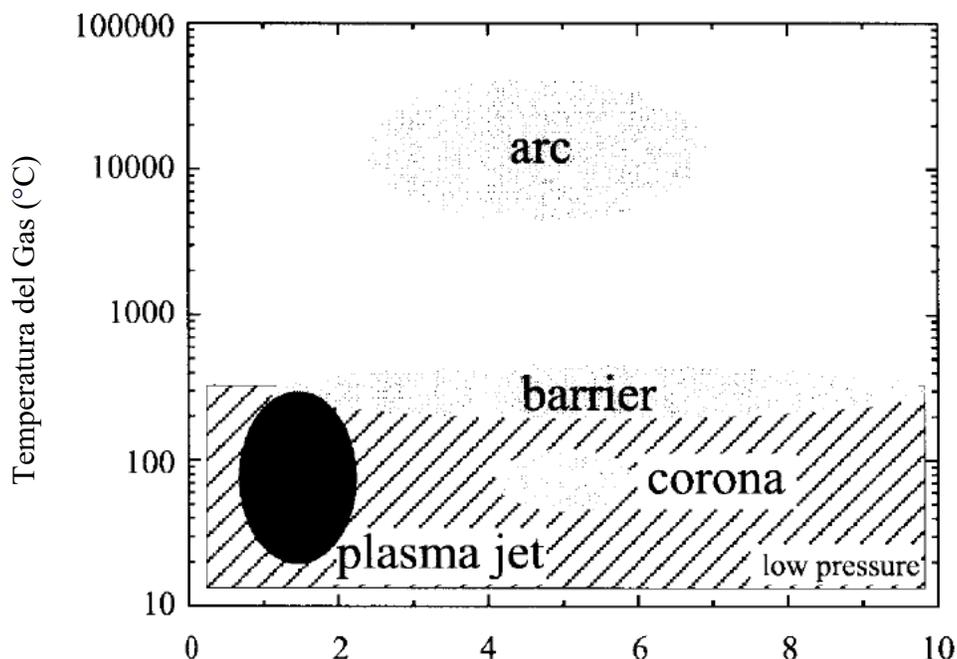


Figura 6: Comparación de diferentes APP y APPJ por temperaturas del gas y de electrones donde la traducción de “barrier” son DBD, “arc” son arcos de plasma y “low pressure” son descargas de baja presión.¹⁶

Con las características comparadas en la figura 6, más un control en el procesamiento del mismo, las técnicas en distintas áreas de la ciencia e ingeniería pueden evolucionar, desde sintetizar por primera vez un diamante por deposición química de vapor con APPJ¹⁹, o actuar como descontaminante de sustancias químicas y biológicas al ser un efectivo sustituto neutralizador para esporas de ántrax ya que no causa corrosión en los componentes eléctricos o plásticos a diferencia de otros métodos convencionales de descontaminación húmeda²⁰. Inclusive se advierte que puede desempeñar un papel en la estimulación plasmática, generando efectos en el tratamiento del sistema inmunológico para enfermedades patológicas como el cáncer; con la configuración correcta se logró la muerte celular en pruebas hechas en animales, la cual produce una cadena de señales para detener la progresión de la enfermedad, además, los efectos durarían el resto de la vida debido a la generación de memoria celular.²¹

1.5 Diagnostico

1.5.1 Espectros Ópticos de Emisión

Toda fuente de luz produce radiación electromagnética, considerada como una fuente de energía que se propaga a través de superposición de ondas caracterizadas por frecuencias, al unir las se genera una porción del espectro electromagnético. La energía propagada a través de cantidades discretas es detectada siempre y cuando interactúe con un medio material, ya que sin esta interacción no sería factible la descomposición de la luz, que es imprescindible para este proceso. A partir de la necesidad del análisis de las fuentes de luz, es que se crea la espectroscopia, la rama de la ciencia encargada de estudiar dicha interacción entre la radiación electromagnética y la materia²².

Si toda fuente de luz produce radiación, entonces cualquier muestra que se pueda excitar adecuadamente podría emitir radiación electromagnética. En este proceso de excitación de los átomos, los electrones en condiciones normales se encuentran en el estado de energía más bajo, en el momento en el que se suministra energía externa al sistema puede suceder que algunos de estos electrones incrementen su energía y pasen a estados más altos, los cuales tenderán a regresar a su estado fundamental liberando dicha energía en forma de fotones. En este proceso de cambio de niveles de energía existe un número limitado de transiciones, cada fotón liberado tendrá una intensidad característica en función de la frecuencia de su onda y de su velocidad, cada transición generará entonces longitudes de onda específicas. Suponiendo que hay una cantidad de electrones que se encuentran en el estado de energía E_i y estos pasan a un estado E_j por un proceso de desexcitación, donde $E_i < E_j$ cada átomo que regrese a su estado base tendría una energía de la radiación emitida dada por:

$$E_{j \rightarrow i} = E_j - E_i = \hbar\omega \quad \text{ecuación (13)}$$

Donde $\hbar = 1.054 \times 10^{-34} \text{Js}$ es la constante de Planck reducida que relaciona la cantidad de energía y la frecuencia ω asociadas a un cuanto, en esta transición cada fotón liberado generará una línea característica o una línea espectral, y como existen estados de energía definidos y transiciones definidas, en este proceso ($E_{j \rightarrow i}$), la emisión de átomos consistirá en generar una serie de líneas espectrales con longitud de onda (λ) específicas provocando que cada elemento tenga su propio espectro de emisión característico²³.

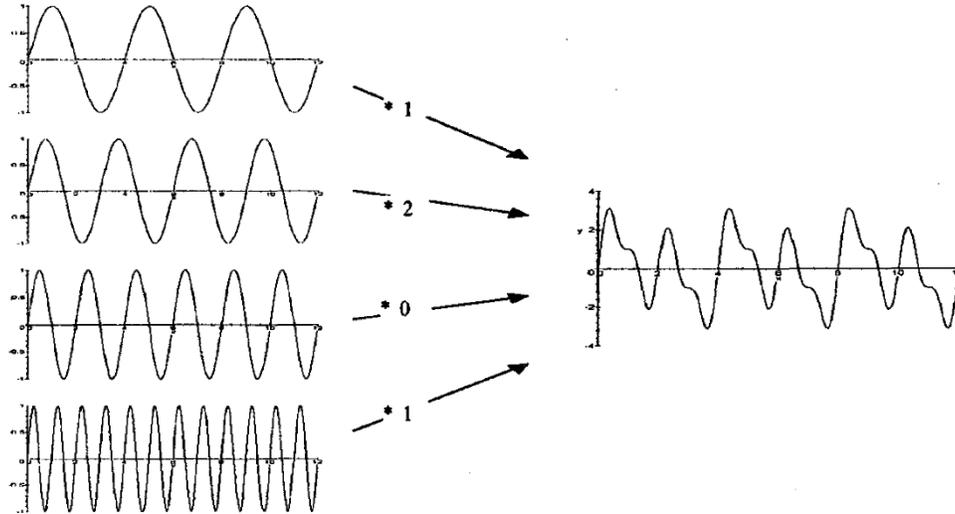


Figura 7: Señal genérica formada por la superposición de ondas.²⁶

Como toda esta información de energía llega en función de la superposición de ondas (figura 7) es imprescindible entenderla. En 1747 D'Alembert empezó con el estudio "tratado de las oscilaciones de las cuerdas del violín". Su ecuación, describe cómo las ondas se propagan en el espacio y el tiempo. En la espectroscopia óptica de emisión, esta ecuación se aplica a las ondas de luz emitidas por el electrón durante la transición. La ecuación de D'Alembert se expresa como:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{c^2 \partial^2 u}{\partial x^2} \quad \text{ecuación (14)}$$

donde u es la función de onda que describe la onda de luz, t es el tiempo, x es la posición, y c es la velocidad de la luz.

Por otro lado, en el modelo de Bohr, la energía de transición del electrón en un átomo se puede representar como un oscilador armónico. La frecuencia de oscilación está relacionada con la energía de transición a través de la siguiente ecuación:

$$f = E/\hbar \quad \text{ecuación (15)}$$

donde f es la frecuencia de oscilación, E es la energía de transición y \hbar es la constante de Planck reducida.

En la espectroscopia óptica de emisión, el espectrómetro se utiliza para separar la luz emitida en sus diferentes longitudes de onda, lo que permite identificar los elementos presentes en la muestra. La posición de los picos en el espectro de emisión está relacionada con la frecuencia de la onda de luz y, por lo tanto, con la energía de transición del electrón en el átomo. La relación entre la energía de transición y la longitud de onda se expresa a través de la ecuación de Planck:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad \text{ecuación (16)}$$

donde E es la energía de transición, $h = 1.626 \times 10^{-34} \text{Js}$ es la constante de Planck, c es la velocidad de la luz y λ es la longitud de onda de la luz.³⁶

En resumen, la espectroscopia óptica de emisión, el oscilador armónico y la ecuación de D'Alembert se relacionan a través de la emisión de radiación electromagnética en los átomos, la propagación de ondas de luz y la relación entre la energía de transición y la frecuencia o longitud de onda de la luz.³⁷

La espectroscopia óptica de emisión (OES) por sus siglas en inglés, cuantificará la emisión mediante un captador de luz, compuesto por sistemas ópticos estructurados por la combinación de lentes, fibra óptica o espejos, que recopilan esta señal emitida por una fuente de luz en forma de radiación electromagnética que conducirá a los fotones según su diferente longitud de onda; por compleja que sea la descompondrá en una suma de funciones periódicas simples de distinta frecuencia, y la información obtenida se comparará con una base de datos del comportamiento de distintos elementos.

OES es una técnica analítica muy confiable y ampliamente utilizada para determinar la composición elemental de una extensa gama de materiales. La parte del espectro electromagnético que utiliza incluye el espectro visible y parte del espectro ultravioleta. En términos de longitud de onda, algunos aparatos lo hacen desde 200 nanómetros hasta alrededor de 1200 nanómetros; y en comparación con otras técnicas analíticas, tiene muchas ventajas: es rápido y relativamente fácil de usar, mide una amplia gama de elementos y concentraciones en muchos tipos diferentes de materiales, es extremadamente preciso cuando se miden niveles bajos de elementos y tiene un costo bastante bajo en comparación con otras técnicas. Es una opción ideal para aplicaciones donde se requiere conocer la descomposición exacta y cuantitativa del material.

1.5.2 Corriente y voltaje

Independientemente de la radiación natural que puede afectar a un gas, no conduce electricidad, pero si algún fenómeno produce una descarga eléctrica sobre éste, empezará a

conducirla debido a la ionización de sus átomos, producida por una diferencia de potencial entre los electrodos donde se produce la descarga en presencia de dicho gas ionizado, obedeciendo los mismos procesos físicos que se dan entre las partículas cargadas transportadas en el plasma y producidas y absorbidas en los electrodos, por lo tanto, la conducción eléctrica a través del plasma no se regirá precisamente por la ley de Ohm²⁷.

Para generar y mantener las DBD es necesario alimentar continuamente el sistema con una fuente externa para que el plasma no regrese a su estado inicial (gas). Se denomina al valor inicial en el voltaje para producir la descarga como “voltaje de rompimiento” $V(t)$, una vez alcanzado ese valor inmediatamente se produce un flujo en la corriente entre los electrodos regido por la Ley de Paschen. Este voltaje de ruptura dependerá del tipo de gas suministrado, la separación d entre los electrodos y la presión P de trabajo relacionados por la ecuación:

$$V(t) = V_b = \frac{A(P d)}{\ln(P d)+B} \quad \text{ecuación (17)}$$

Recordando que A y B son constantes vinculadas con el tipo de gas inyectado y el material utilizado. Cuando el valor del voltaje es inferior al requerido, prácticamente la ionización es nula, pues si el plasma se somete a una perturbación de frecuencia menor que la frecuencia de plasma de las partículas cargadas, las mismas tratarán de mantener de forma neutral al plasma, por lo cual también es importante considerar la propia frecuencia de las oscilaciones debido a las interacciones colectivas del plasma, el cual es directamente proporcional a la raíz cuadrada de la concentración de las especies cargadas e inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la masa. Esta diferencia de oscilaciones produce una variación entre las frecuencias de los electrones e iones del plasma, dando origen a un comportamiento variado del mismo, conocido como fenómeno de dispersión.⁸

1.5.3 Potencia eléctrica

Para muchas aplicaciones de DBD o APPJ es altamente deseable conocer la potencia disipada en la descarga, el método del condensador es el medio más preciso para medir la potencia del plasma. Para ello previamente se deben introducir las figuras de Lissajous, que son las construcciones geométricas que se obtienen cuando dos osciladores armónicos vibran en direcciones perpendiculares entre sí.

Sea A un punto sometido a un doble movimiento armónico simple en dos direcciones perpendiculares (x, y) a través del tiempo t producidas por $x(t) = A' \text{sen}(w_x t)$, $y(t) = A' \text{sen}(w_y t + \emptyset)$ con amplitud $A' = 1$. La forma de la curva dependerá exclusivamente de la relación entre las frecuencias de los dos movimientos, $\frac{w_x}{w_y}$ y de su desfase \emptyset , de tal forma que el movimiento de A es determinado por:

$$A = \begin{cases} x(t) = \text{sen}(w_x t) \\ y(t) = \text{sen}(w_y t + \emptyset) \end{cases} \quad \text{ecuación (18)}$$

Sí $\frac{w_x}{w_y} = 1$, la curva es un segmento, una elipse o una circunferencia en función del desfase, como se muestra en la figura 8.

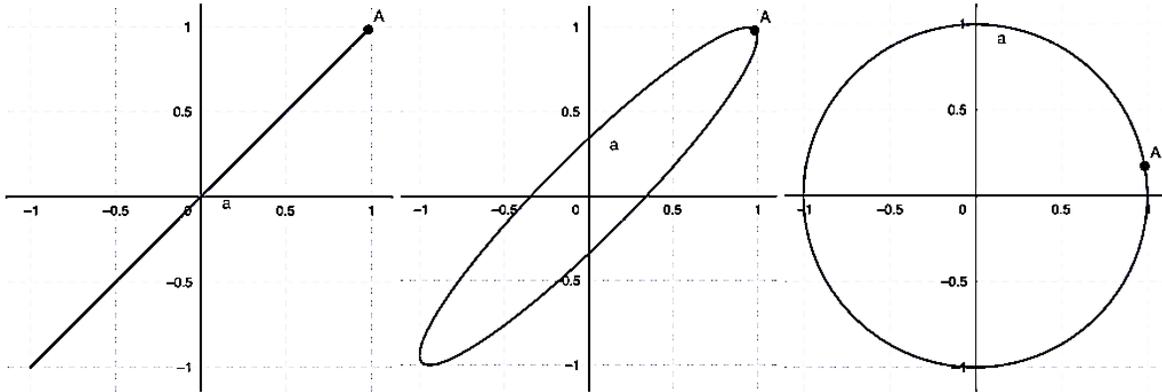


Figura 8: Figuras de Lissajous, en todos los casos $A' = 1, w_x = 4, w_y = 4, t = 20$, a) $\phi = 90^\circ$, b) $\phi = 95^\circ$, c) $\phi = 112.5^\circ$.

En el caso de DBD, estos diagramas como los de la figura anterior, se obtienen mediante una relación carga-voltaje, haciendo un gráfico (x, y) del voltaje $V(t)$ a través de los electrodos de la descarga contra la carga $Q(t)$ generada durante la misma. El voltaje a través de los electrodos se mide usando una sonda de alto voltaje calibrada con una atenuación de 100: 1, conectada lo más cerca posible de los electrodos.

Una vez establecidas las escalas para conocer el voltaje, se puede construir la gráfica $(V(t), Q(t))$ como la de la figura 9:

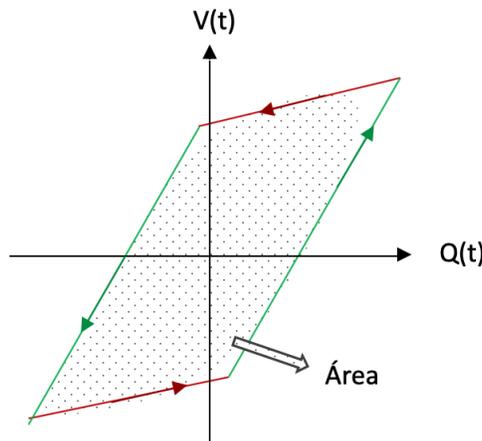


Figura 9: Diagrama QV ideal con la forma característica del paralelogramo. Plasma apagado (segmento rojo), plasma encendido (segmento verde). Las flechas indican la dirección del tiempo.

$$P = V(t)I(t) \quad \text{ecuación (19)}$$

Sí la relación matemática entre la corriente $I(t)$, el tiempo t , y la carga $Q(t)$ es:

$$I(t) = \frac{dQ(t)}{dt} \quad \text{ecuación (20)}$$

Y considerando la carga transferida entre un ciclo completo ($0 \rightarrow T$), la ecuación (26) queda como:

$$P = \int_0^T V(t) \frac{dQ(t)}{dt} dt \quad \text{ecuación (21)}$$

Para la cual, la potencia eléctrica media:

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dQ(t) \quad \text{ecuación (22)}$$

Se tendría que buscar el término del diferencial de carga $dQ(t)$ para realizar el cálculo completo, lo cual involucra construir un diagrama típicamente de una DBD como el siguiente circuito:

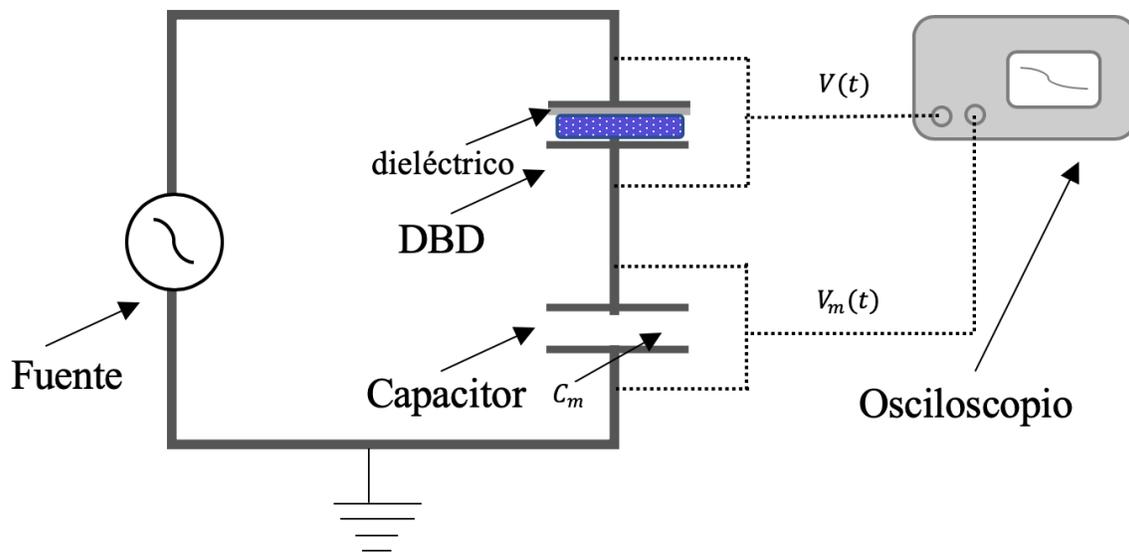


Figura 10: Esquema básico de un sistema para generar diagramas carga-voltaje usando DBD.

En la figura anterior, la capacitancia almacenada representada por un valor fijo C_m esta estrechamente relacionada con la carga acumulada durante la descarga de la siguiente manera:

$$C_m = \frac{Q(t)}{V_m(t)} \quad \text{ecuación (23)}$$

Si se considera un diferencial de carga, se despeja de la ecuación anterior y se sustituye en la ecuación (22) entonces:

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) C_m dV_m(t) \quad \text{ecuación (24)}$$

Finalmente, si el circuito tiene conectado una capacitancia con un valor constante, la expresión anterior queda como:

$$\bar{P} = \frac{C_m}{T} \int_0^T V(t) dV_m(t) \quad \text{ecuación (25)}$$

Donde $\int_0^T V(t) dV_m(t)$ representa el área bajo la curva producida por la figura de Lissajous en el osciloscopio, siempre y cuando se hagan las conexiones adecuadas durante un ciclo completo de la descarga.

Adicionalmente, dicha figura de Lissajous puede producirse de forma elíptica, pudiéndolo provocar diferentes causas; por la inductancia producida en la fase de descarga, ya que la corriente producida en el medio puede ser mayor que la del circuito; por el aumento de potencia o por la densidad de electrones residuales en el espacio de descarga que se producen en el periodo de “plasma apagado” entre los ciclos de carga en la fase gaseosa²⁸.

1.5.4 Divisor de voltaje

Un circuito de resistores en serie se le puede llamar divisor de voltaje si cumple con la característica de disminuir el voltaje suministrado en la salida de un nodo del circuito; esto con el fin de cuantificar los volts que se aplican durante la descarga del plasma producido por la fuente de alto voltaje (HV). Su voltaje de salida es una fracción fija de su voltaje de entrada. La razón de la entrada a la salida está determinada por el conjunto de las resistencias.

Si se considera un circuito básico de 2 resistencias como el de la figura 11:

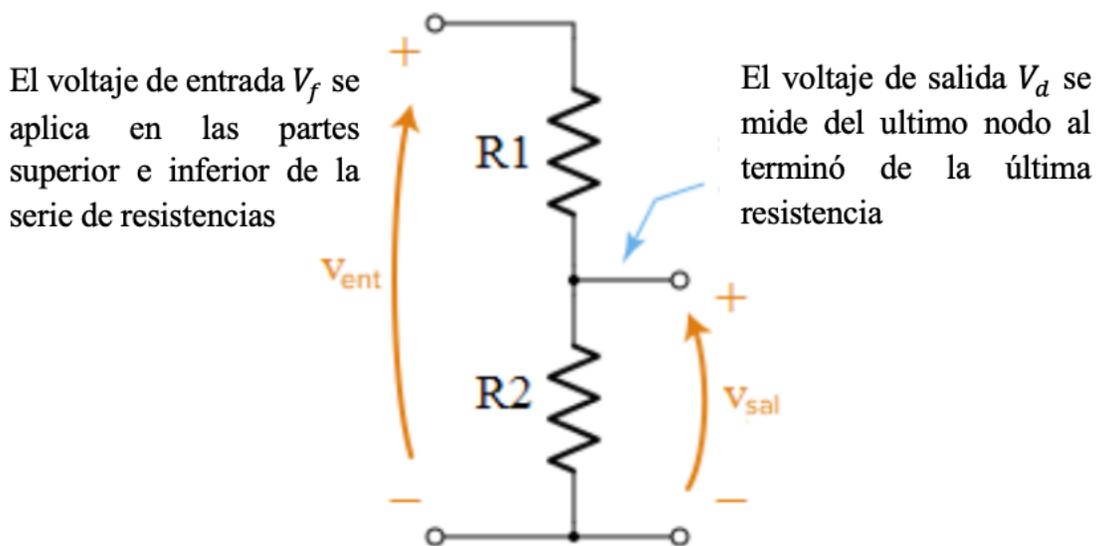


Figura 11: Diagrama de resistencias en serie

El objetivo será obtener una expresión que relacione el voltaje de salida con el voltaje de entrada para un conjunto n de resistencias.

De acuerdo con la Ley de Ohm:

$$V_f = R_T I_T \quad \text{ecuación (26)}$$

Donde V_f es el voltaje suministrado por la fuente, R_T el conjunto de las resistencias conectadas en el circuito e I_T la corriente total que circula a través de él. Para un circuito con resistencias en serie, se tiene:

$$V_f = \sum V_i \quad \text{ecuación (27)}$$

$$I_T = I_i \quad \text{ecuación (28)}$$

$$R_T = \sum R_i \quad \text{ecuación (29)}$$

Si se configuran las resistencias como:

$$R_1 = R_2 = \dots = R_{n-1} = R \quad \text{ecuación (30)}$$

y sustituyendo en la ecuación (33) de acuerdo con (32):

$$V_f = (n-1)RI_T + R_n I_T = (n-1)RI_T + V_n \quad \text{ecuación (31)}$$

Despejando a V_n de la ecuación anterior:

$$V_n = V_f + (1-n)RI_T \quad \text{ecuación (32)}$$

Si se sustituye $I_T = \frac{V_f}{(n-1)R + R_n}$ en (32):

$$V_n = V_f + \frac{(1-n)RV_f}{(n-1)R + R_n} = V_f \left[1 + \frac{(1-n)R}{(n-1)R + R_n} \right] \quad \text{ecuación (33)}$$

Finalmente despejando V_f de la ecuación (33) y haciendo el cambio de variable $V_n = V_d$ queda como:

$$V_f = \frac{V_d}{\left[1 + \frac{(1-n)R}{(n-1)R + R_n} \right]} \quad \text{ecuación (34)}$$

V_d representa el valor de salida del voltaje en el divisor²⁹.

1.5.5 Voltaje en función de la frecuencia.

La respuesta del voltaje para circuitos senoidales, como es el caso de las bobinas del transformador de la fuente, está en función de la frecuencia, la cual varía debido a la impedancia producida por la inductancia, esta última es una propiedad del cable en forma de espiras, por lo cual hay una corriente inducida por la propia bobina oponiéndose al paso de la corriente de esta. Como consecuencia, se debe determinar en qué punto se genera un máximo de amplitud en la frecuencia, denominada como “frecuencia de resonancia de amplitud (FRA)”. Si además el circuito posee capacitores puede haber un momento en que los efectos inductivos y capacitivos se cancelen, obteniendo una “frecuencia de resonancia de fase (FRF)”, siempre y cuando el circuito se comporte como resistivo puro y la corriente y voltaje quedarían en fase.

1.5.6 FRF en un circuito en serie.

Cuando a una frecuencia específica, los efectos capacitivos e inductivos en el circuito se cancelan entre sí, es decir, cuando la reactancia tiene el mismo valor absoluto, el fenómeno de resonancia de fase aparecerá en el circuito, por lo que el circuito se comporta como puramente resistivo (ver figura 12).

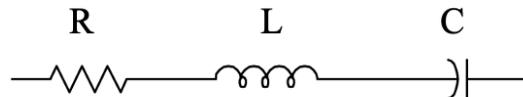


Figura 12: Circuito RLC

Para la rama mostrada, la impedancia es:

$$Z = R + jX = R + j\omega L - j\frac{1}{\omega C} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad \text{ecuación (35)}$$

expresión en la cual vemos que podemos encontrar una frecuencia donde las reactancias serán iguales y opuestas, entonces X sería igual a 0, la expresión anterior queda como:

$$\omega_o L - \frac{1}{\omega_o C} = 0 \quad \text{ecuación (36)}$$

Despejando ω_o :

$$\omega_o = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad \text{ecuación (37)}$$

Por lo tanto, la frecuencia:

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{ecuación (38)}$$

Esta frecuencia f_o recibe el nombre de frecuencia de resonancia de fase.

Gráficamente, podemos trazar las curvas de reactancia y el módulo de impedancia del circuito (ver figura 13):

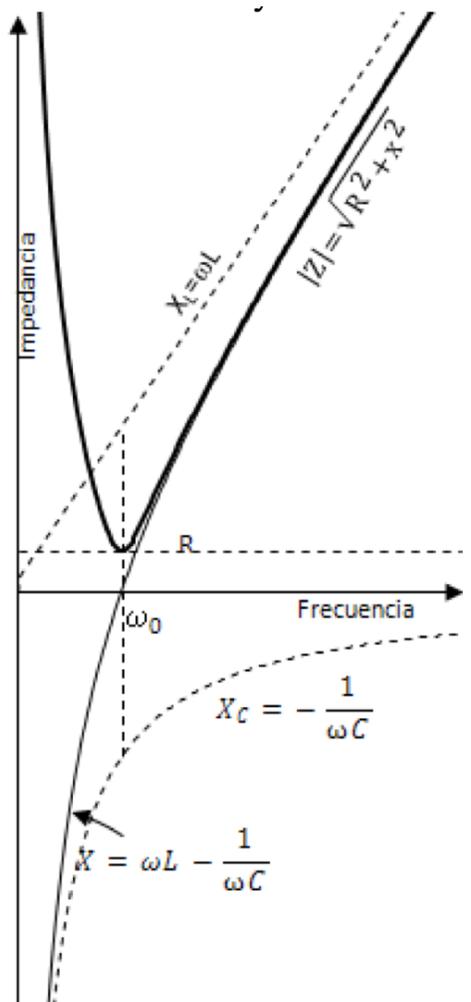


Figura 13: Impedancia en función de la frecuencia.

Si trazamos los diagramas fasoriales correspondientes a los distintos comportamientos (inductivo, resistivo, capacitivo), veremos que, efectivamente, las tensiones en bornes de L o C pueden superar el voltaje de alimentación, pudiendo ser peligrosas, sobre todo si tenemos en cuenta que las mismas pueden ser 50 o 100 veces mayores que la alimentación, con riesgo para el operador y para el propio circuito.

Analizando la gráfica de la figura 13 se puede deducir que:

1) Las curvas de X_L (recta) y de X_C (hipérbola rectangular) son función de la frecuencia. Su suma es la reactancia total del circuito, y va desde un valor negativo grande, cruza el eje real en ω_0 y llega a valores positivos indefinidamente grandes, asintóticamente a la reactancia inductiva.

2) La recta horizontal representa la R constante, o sea, la suponemos independiente de la frecuencia. Interesa conocer el valor correcto de R a frecuencias próximas a resonancia.

3) La curva de z es la suma vectorial de R y X , o sea $z = R^2 + X^2$ cuya representación tiene la forma de una curva en V , ligeramente redondeada en la parte inferior hasta ser tangencial a R . Salvo a $f \approx f_0$, es casi idéntica en magnitud a X .

1.5.7 Curvas de admitancia

Ahora bien, desde el punto de vista práctico, casi toda la información importante acerca del comportamiento del circuito en resonancia está contenida en el extremo redondeado de la curva en V , que no se puede apreciar correctamente debido al formato de la gráfica. Por eso es más útil representar la admitancia, $Y=1/Z$, como se muestra en la gráfica de la figura 14, lo cual hace posible mostrar claramente el efecto de distintos valores de R .

Como el eje “y” es pequeño a frecuencias lejanas de la resonancia, se ha representado con una escala de frecuencias extendida, dejando solo un 10% a cada lado de ω_0 . La escala de frecuencias es logarítmica, lo cual simetriza la curva respecto a la recta vertical ω_0 , según analizaremos más adelante en este mismo capítulo. También se trazó la característica del ángulo de la admitancia, el cual es positivo a bajas frecuencias (circuito capacitivo), cero en resonancia (circuito resistivo) y negativo a altas frecuencias (circuito inductivo).

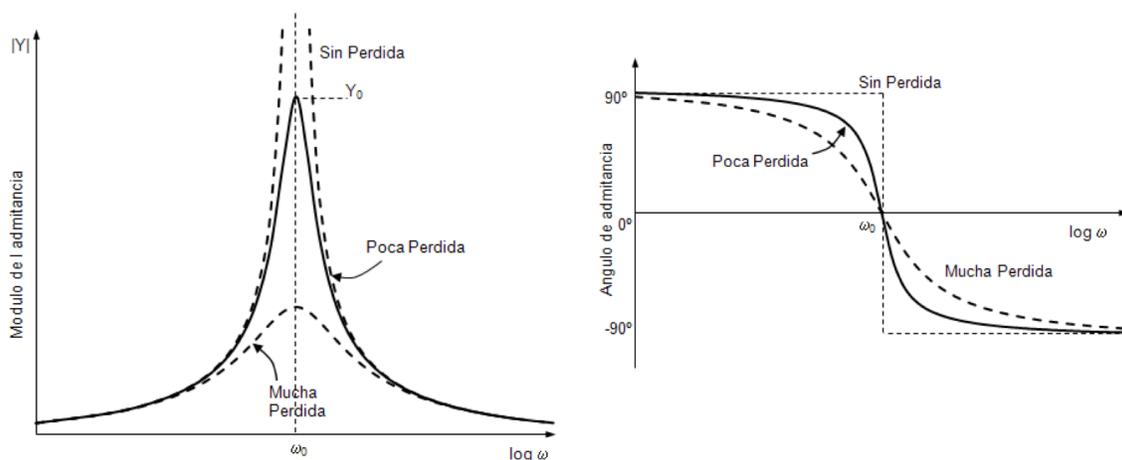


Figura 14: Admitancia de un circuito en serie, módulo y fase.

En la curva de la gráfica anterior queda claramente evidenciada la incidencia del valor de R , dado que la altura de la curva en resonancia está determinada por la resistencia del circuito, siendo $1/R$ el valor máximo. La curva correspondiente a un valor de R elevado es más achatada que la correspondiente a un valor de R bajo, y si $R = 0 \Omega$ la curva es infinitamente alta (circuito sin pérdidas). A frecuencias alejadas de la de resonancias, las tres curvas se confunden, siendo indistinguibles entre sí.

Capítulo 2: Diseño Experimental

2.1 Desarrollo del mecanismo del jet

El jet de plasma utilizado en este estudio es una descarga de barrera dieléctrica (DBD) tipo APPJ. En el diagrama de la figura 13 se muestra un tubo de vidrio donde se produce la descarga alimentada con gas Helio de grado comercial controlado por un flujómetro MATHESON TRI GAS. Las medidas del tubo son 65mm de largo con un espesor de 1 mm, mientras que el diámetro externo e interno del tubo son de 7.54mm y 6.54mm, respectivamente.

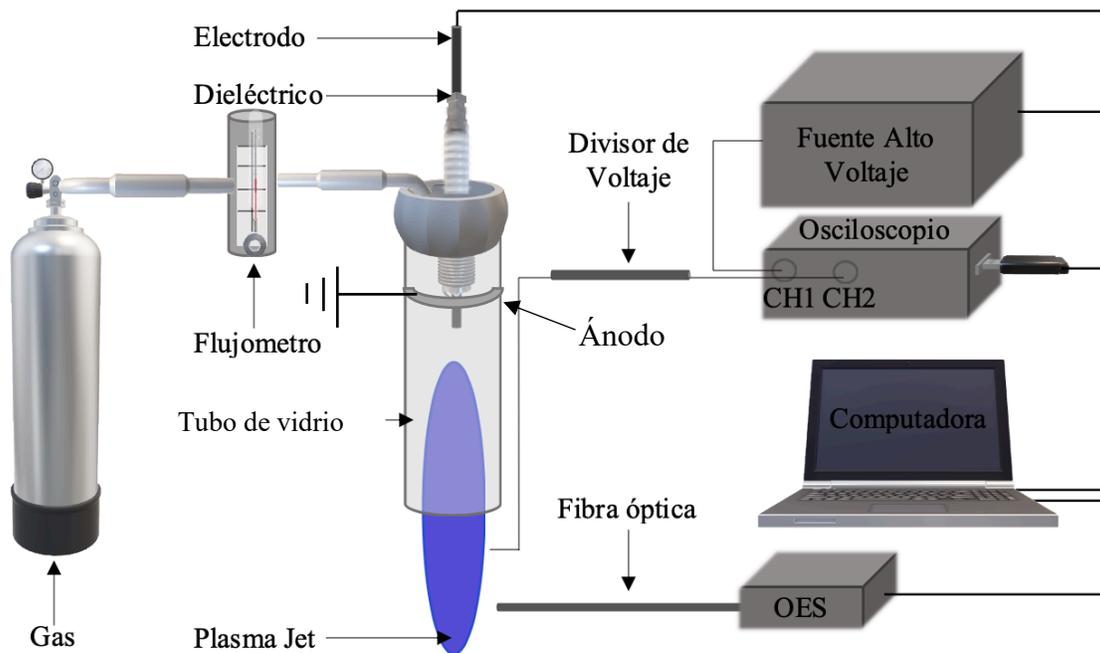


Figura 15: Conexión de los dispositivos que conforman el sistema experimental.

El dispositivo se basó en un prototipo como el de la figura 15, hecho de material polímero con un electrodo único de tungsteno concéntrico al tubo, conectado a una fuente de alimentación.

2.1.1 Sistema experimental

Una vez hecha la ignición se produce una descarga como en la figura 16, dentro de la cámara produciendo una interacción con el flujo continuo de gas Helio a presión atmosférica

conectado previamente a la misma. Esto genera una columna positiva de especies de carga en el exterior de la cámara con terminación circular en dirección colineal a la punta del electrodo llamada “zona del jet” dispuesto a ser incidido en el lugar de trabajo o superficie.

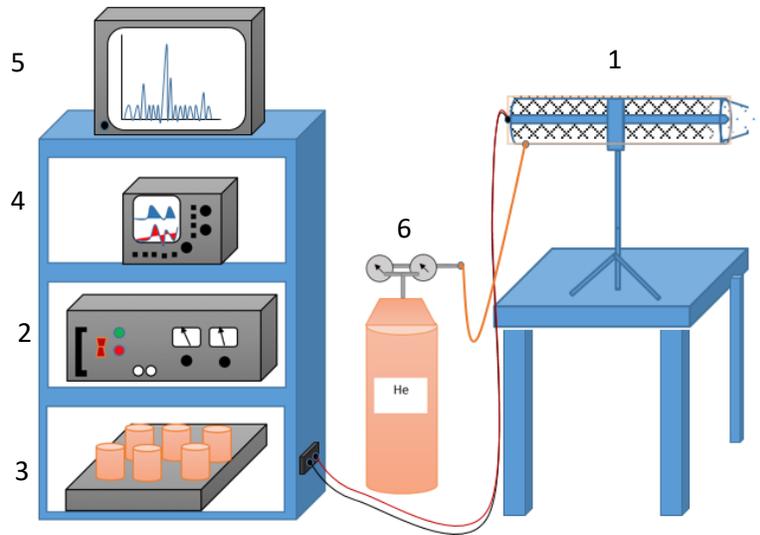


Figura 16: Infraestructura: 1) Prototipo 2) Fuente DC 3) Transformador 4) Osciloscopio 5) Software 6) Gas.

El plasma Jet será caracterizado con una sonda óptica Ocean Optics para obtener OES, que son interpretados en una interfaz de software con el fin de entender cuáles son las principales especies producidas por la descarga luminiscente.

Infraestructura:

- Fuente pulsada DC, MINIPULS 6 UNIVERSAL GBS ELEKTRONIK, GmbH.
- Osciloscopio, Tektronix TDS1024B eScope, 100MHz, 1.25GS/s DPO.
- Espectrómetro, Ocean Optics, modelo FLAME-T-UV-VIS.
- Sonda Óptica, Ocean Optics, modelo QP600-1-UV-VIS OOS-006695-28.
- Software OceanView, versión 1.6.5
- Transformador en forma de cascada, Minipulse 6 KasKade.
- Gas Helio, alta pureza 5.0.
- Cilindro de vidrio.
- Electrodo de Tungsteno.
- Equipo de Cómputo.

2.1.2 Diseño del plasma jet

Para dar una descripción más detallada del diseño del dispositivo, se describe la figura a continuación:

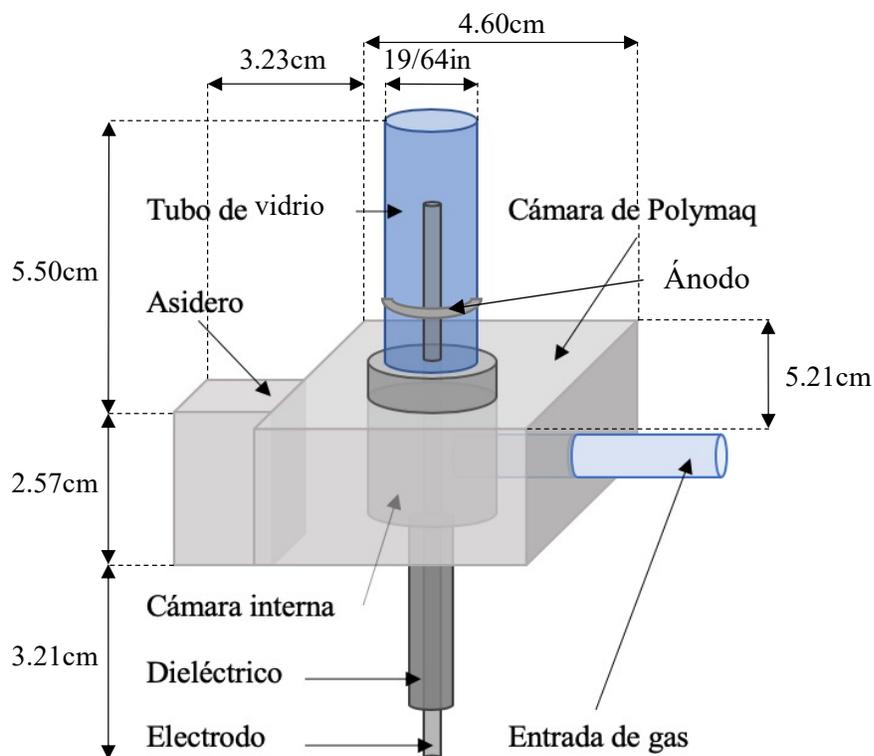


Figura 17: Prototipo del Jet.

La descarga se produce al aplicar un voltaje de DC pulsado a través de un electrodo metálico colocado dentro de un tubo de vidrio evacuado y llenado con gas a presión atmosférica.

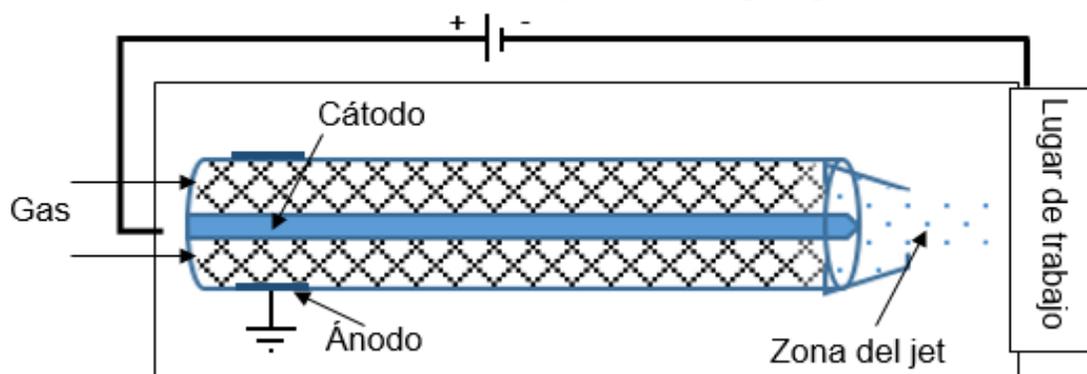


Figura 18: Prototipo de la fuente para generar Plasma Jet.

En la figura 18 se describe el prototipo del armado experimental que incluye una cámara cilíndrica de vidrio, que almacena en el interior un electrodo concéntrico al eje horizontal fabricado con tungsteno por su bajo desgaste y estabilidad dimensional, fungiendo como

cátodo, el cual se encuentra conectado a una fuente pulsada DC (MINIPULS 6 UNIVERSAL GBS ELEKTRONIK, GmbH) controlada en un intervalo de producción de 3 kV-10 kV gracias a una conexión adicional a un transformador en forma de cascada; mientras es caracterizado por un osciloscopio para determinar los valores óptimos de corriente, voltaje y frecuencia para la generación de la descarga.

2.1.3 Espectrómetro y fibra óptica

Con el fin de obtener de forma óptima las propiedades de la luz provenientes de la emisión del plasma y adquirir las líneas atómicas características con una alta resolución, se utiliza un espectrómetro Ocean Optics HR4000 CG-UV-NIR como el de la figura 19, que proporciona una resolución óptica de 0.025 nm (FWHM), abarcando un intervalo entre los 200-1100nm de longitudes de onda; operado por una matriz lineal CCD (Charge Coupled Device por sus siglas en inglés) modelo Toshiba TCD1304AP capacitado con una sensibilidad de 100 fotones por conteo a los 800 nm. Para proporcionar la información es conectado a través de un puerto USB al computador habilitado con el software OceanView Spectroscopy.

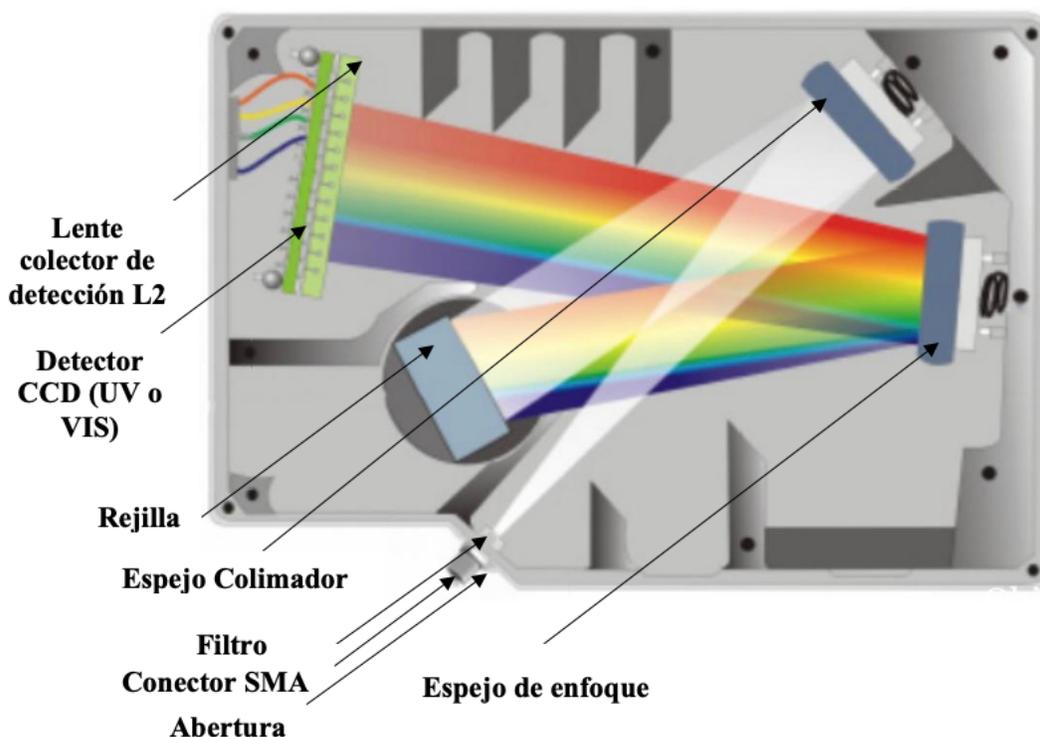


Figura 19: Espectrómetro HR4000 con componentes.

El espectrómetro HR4000 tiene una dimensión de 148,6 mm x 104,8 mm x 45,1 mm y una de 570 g con un consumo de energía 450 mA a 5 VCC y trabaja con la siguiente configuración en sus componentes:

Conector SMA. Fija la entrada del banco óptico o fibra al espectrómetro.

Abertura. Una hendidura rectangular para regular la cantidad de luz que ingresa y así controlar la resolución espectral.

Filtro. Limita la radiación a ciertas regiones de longitud de onda.

Espejo Colimador. Focaliza la luz que ingresa por la fibra óptica hacia la Rejilla.

Rejilla. Difracta la luz del Espejo Colimador y dirige la luz difractada hacia el Espejo de enfoque.

Espejo de enfoque. Acepta la luz que es reflejada por la rejilla y la enfoca sobre el detector CCD o sobre la Lente colector de detección L2, dependiendo de la configuración del espectrómetro.

Lente colector de detección L2. Enfoca la luz de una rendija alta hacia los elementos del Detector CCD más cortos, siendo un componente opcional que se conecta al Detector CCD.

Detector CCD (UV o VIS). Recolecta la luz recibida del Espejo de enfoque o Lente colector de detección L2 y convierte la señal óptica en una señal digital, donde cada píxel corresponde a la longitud de onda de la luz que lo golpea.

Dichos componentes de Ocean Optics funcionan en un sistema de muestreo de la siguiente manera:

1. El usuario almacena las medidas de referencia y oscuras para corregir las variables de respuesta del instrumento.
2. La luz de la fuente de luz se transmite a través de una fibra óptica a la muestra.
3. La luz interactúa con la muestra.
4. Otra fibra óptica recoge y transmite el resultado de la interacción al espectrómetro.
5. El espectrómetro mide la cantidad de luz y transforma los datos recopilados por el espectrómetro en información digital.
6. El espectrómetro pasa la información de la muestra al software.
7. El software compara la muestra con la medición de referencia y presenta información espectral procesada.

Para poder realizar las lecturas procedentes de la emisión, es necesario captar la luz de la fuente por un extremo con una fibra óptica Ocean Optics UV-Visible, los cables en su interior de la conexión actúan como fibras de iluminación y lectura y se conectan fácilmente del otro extremo, el espectrómetro. Ya que es capaz de conducir y transmitir impulsos luminosos de

uno a otro de sus cabos, la información viaja eficiente en un rango de longitudes de onda entre los 300-1100 nm³⁰.

2.1.4 Fuente de voltaje (corriente y voltaje)

En el proceso de creación de una DBD, como aparato fundamental se precisa del generador MINIPULS UNIVERSAL GBS ELEKTRONIK como el de la figura 20, que está diseñado para generar de manera eficiente alto voltaje a frecuencias más altas. Con la ayuda de un transformador en cascada, el bajo voltaje de onda cuadrada de 5-20 kHz se convierte en alto voltaje y con el ajuste en la frecuencia para que esté cerca de la frecuencia de resonancia de la carga.

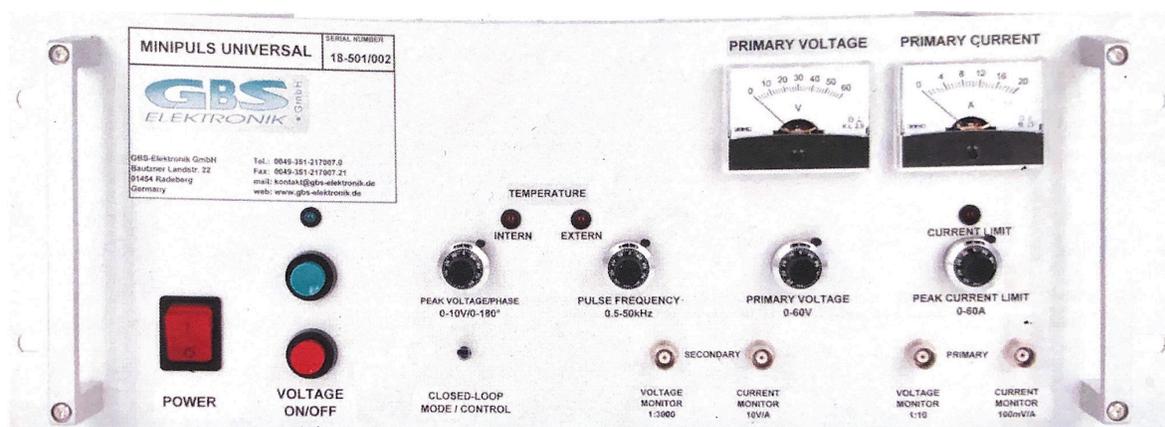


Figura 20: Fuente pulsada DC.

Específicamente el conjunto Minipuls 6 está desarrollado para generar altos voltajes CA de hasta 30 kV pico (= 60 kVpp o 21 kV RMS). El rango de frecuencia de operación es de 5 a 20 kHz. El dispositivo consta de un convertidor de puente completo y una cascada de transformadores.

Los voltajes de entrada se pueden suministrar mediante una fuente de alimentación estándar de laboratorio.

Esta configuración consta de un puente convertidor y un transformador en cascada. El convertidor emite una potente onda cuadrada de bajo voltaje, que luego se conecta en cascada para convertirla y filtrarla en una onda sinusoidal.

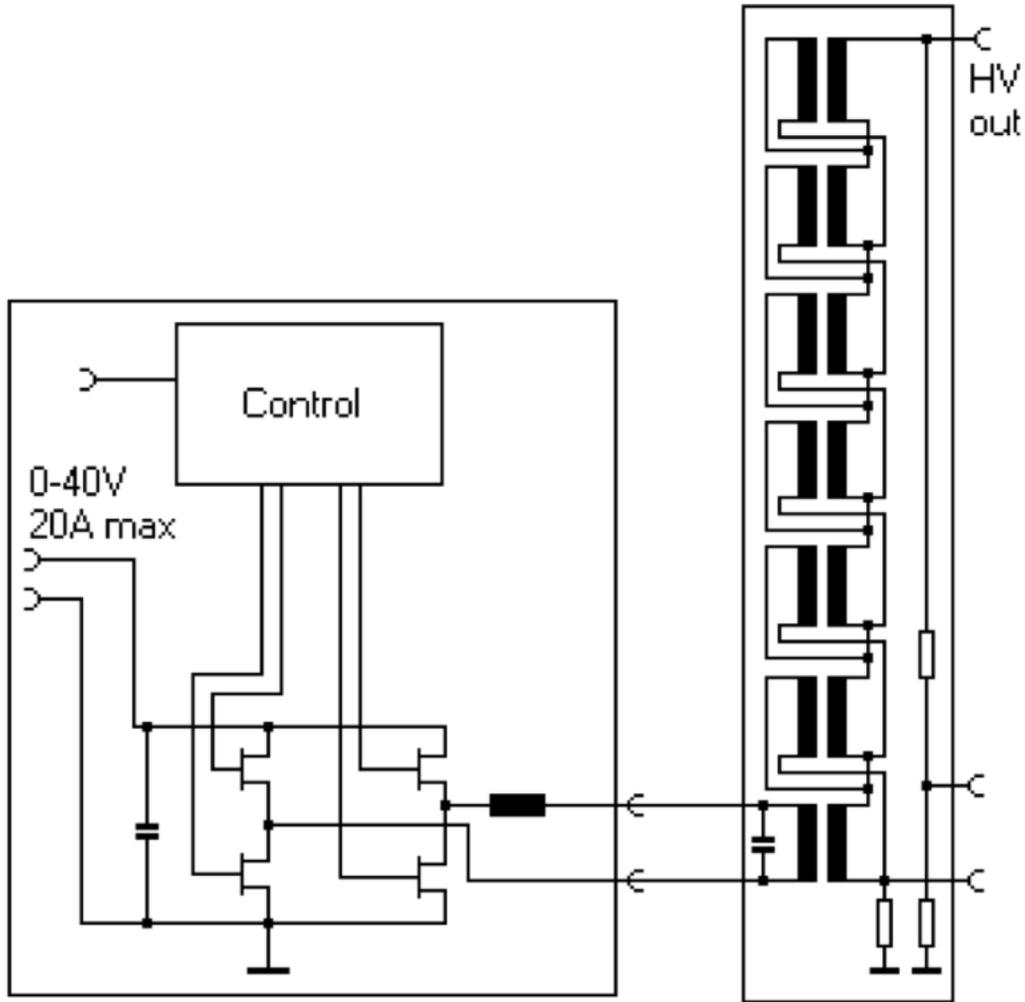


Figura 21: Diagrama del kit del generador Minipuls 6.³¹

Por un lado, el puente convertidor consta de:

- Un voltaje de alimentación de 17-35 V, 0,1 A
- El puente de alimentación va de 0-45 V, 20 A máx, con un enchufe de 6,3 mm
- La potencia de entrada máxima <720 W, potencia de salida media máxima de 700 W, potencia máxima temporalmente superior.
- El límite de corriente de pulso es 80A
- Cuenta con un apagado por exceso de temperatura
- La fuente de alimentación está protegida con un fusible de 20A
- Tiene la frecuencia de pulso nominal de 10 kHz, el rango de frecuencia recomendado es de 5 a 20 kHz; las posibles frecuencias oscilan entre 0 y 50 kHz.

- Tiene lógica de control externo; lógica de control ajustable.
- La forma de onda: el puente completo genera pulsos positivos y negativos, dependiendo de la señal de control.

Por otro lado, las características del transformador en cascada:

- La cascada consta de 8 PM 74 núcleos (ver figura 22).
- El voltaje de salida máximo es 30 kV pico a 10 kHz y una carga nominal de 100 pF.
- Corriente de salida pico máxima es 250mA.
- Con cargas diferentes, pueden producirse otras posibles frecuencias pico y voltajes pico.
- Los últimos 3 transformadores pueden desactivarse y cortocircuitarse, lo que reduce la relación nominal del transformador de 1: 321 a 1: 281, 1: 241, 1: 201. Esto da como resultado un voltaje de salida máximo reducido a un pico de 19 kV, pero la carga nominal aumentó a 250 pF.
- Consta de una salida para monitoreo 1: 3000 del voltaje de salida.
- Una salida para monitorear la corriente de 10V / A para la corriente de salida.
- Está protegido contra sobretensiones por una spark gap (dispara alrededor de 36 kV pico)
- El tamaño de la placa 485 * 200 mm, peso 7,5 kg³¹.

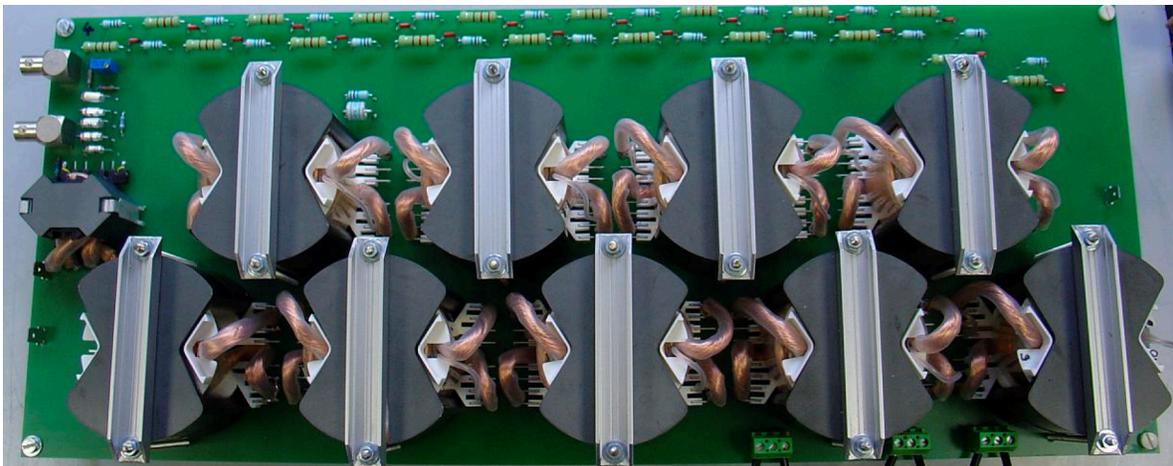


Figura 22: Transformador en cascada Minipuls 6.³¹

2.1.5 Divisor de voltaje

Se busca una atenuación cercana a una escala 1:100 en la medición del voltaje. Para ello se construye una punta de alto voltaje con una siguiente configuración en las resistencias de $R_1 = R_2 = \dots R_9 = R = 10M\Omega$ y $R_n = R_{10} = 1.2M\Omega$, conectadas en serie como el siguiente circuito:

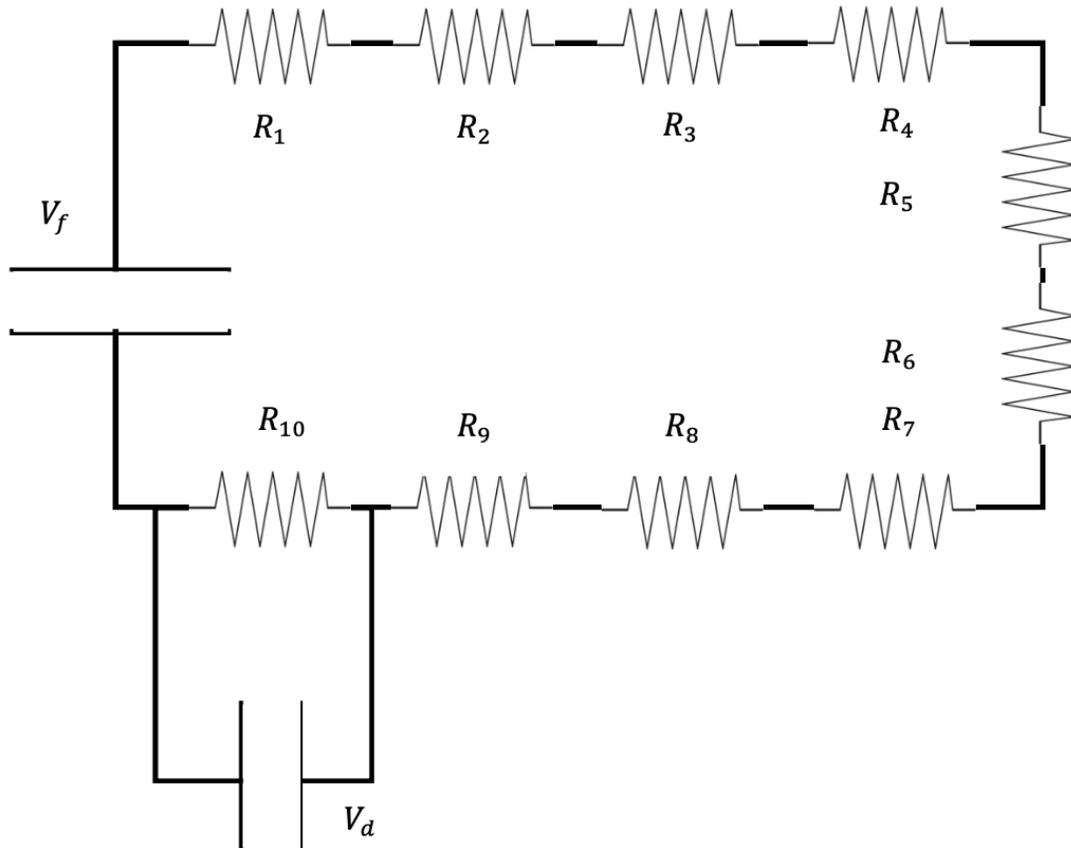


Figura 23: Construcción de resistencias en serie.

De acuerdo con la ecuación (34) y sustituyendo los valores $R = 10M\Omega \pm 5\%$, $R_n = 1.2M\Omega \pm 5\%$ con $n = 10$ resistencias, la ecuación queda como:

$$V_f = \frac{V_d}{1 - \frac{90M\Omega}{91.2M\Omega}} = 76V_d \quad \text{ecuación (39)}$$

Logrando una escala de 1:76.

Realizando las pruebas correspondientes en una fuente Pasco Kilovolt Power Supply SF-9586, haciendo un divisor de voltaje como el esquema anterior con las resistencias mencionadas, se obtuvieron los siguientes datos medidos con un multímetro Fluke 8846A:

<i>Voltaje en la salida directa de la fuente V_f (V)</i>	<i>Voltaje de salida en el divisor (V)</i>
83.14	1.01
125.03	1.51
167.55	2.00
210.04	2.51
252.12	3.00
295.12	3.49
336.70	4.00
379.34	4.50
421.68	5.01
463.63	5.49
506.02	6.00
547.41	6.49
589.21	7.00
630.63	7.49
673.12	8.00

Tabla 3: Comparación de valores en el voltaje de la fuente y el divisor. Elaboración propia.

Al tener una tolerancia de medición el multímetro cerca de los 700V las pruebas se manejaron en un intervalo de 0-673.12V, sin embargo, estos son datos suficientes para modelar la gráfica.

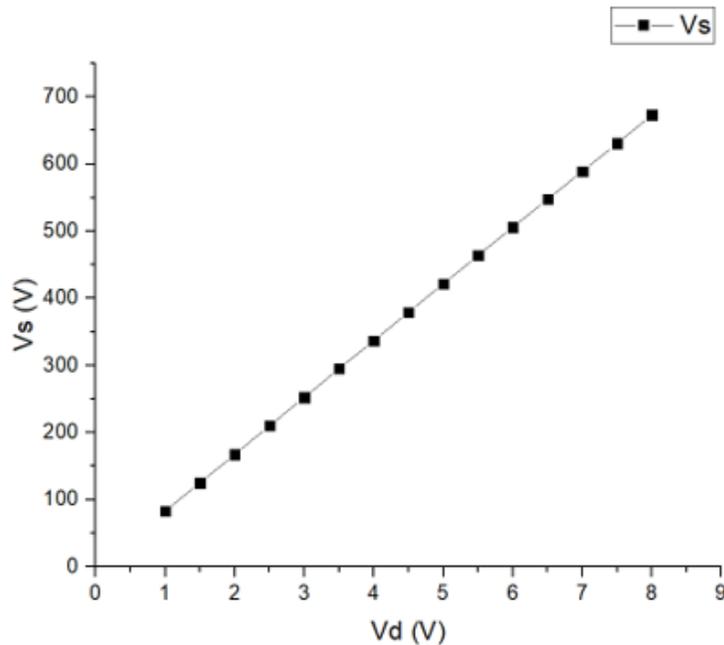


Figura 20: Voltaje de la fuente V_f en función del divisor V_d .

Con el ajuste correspondiente, la dependencia entre el voltaje de la fuente V_f y el divisor V_d queda como:

$$V_f = 84.32V_d - 0.73 \pm 0.38 \quad \text{ecuación (40)}$$

Esta relación será utilizada para cálculos posteriores en el voltaje producidos por la fuente pulsada DC (MINUPULS 6 UNIVERSAL GBS ELEKTRONIK, GmbH)

2.1.6 Osciloscopio

Para la caracterización del voltaje que se produce a lo largo de proceso de encendido, ignición, funcionamiento y apagado del jet, además de su comportamiento, se estudiará con un Osciloscopio de fósforo digital de la serie TDS3000B marca Tektronix. Este instrumento muestra señales eléctricas de forma gráfica que pueden variar en el tiempo. La información recopilada proporciona los valores de las señales en forma de coordenadas en una pantalla dando una relación entre el voltaje y el tiempo, obteniendo oscilogramas, de los cuales se puede determinar el aspecto de la onda de una señal, medir su amplitud y frecuencia, así como el tiempo transcurrido entre dos eventos, también observar si la señal es de corriente continua (CC) o alterna (CA) y comprobar si hay ruido en la misma.

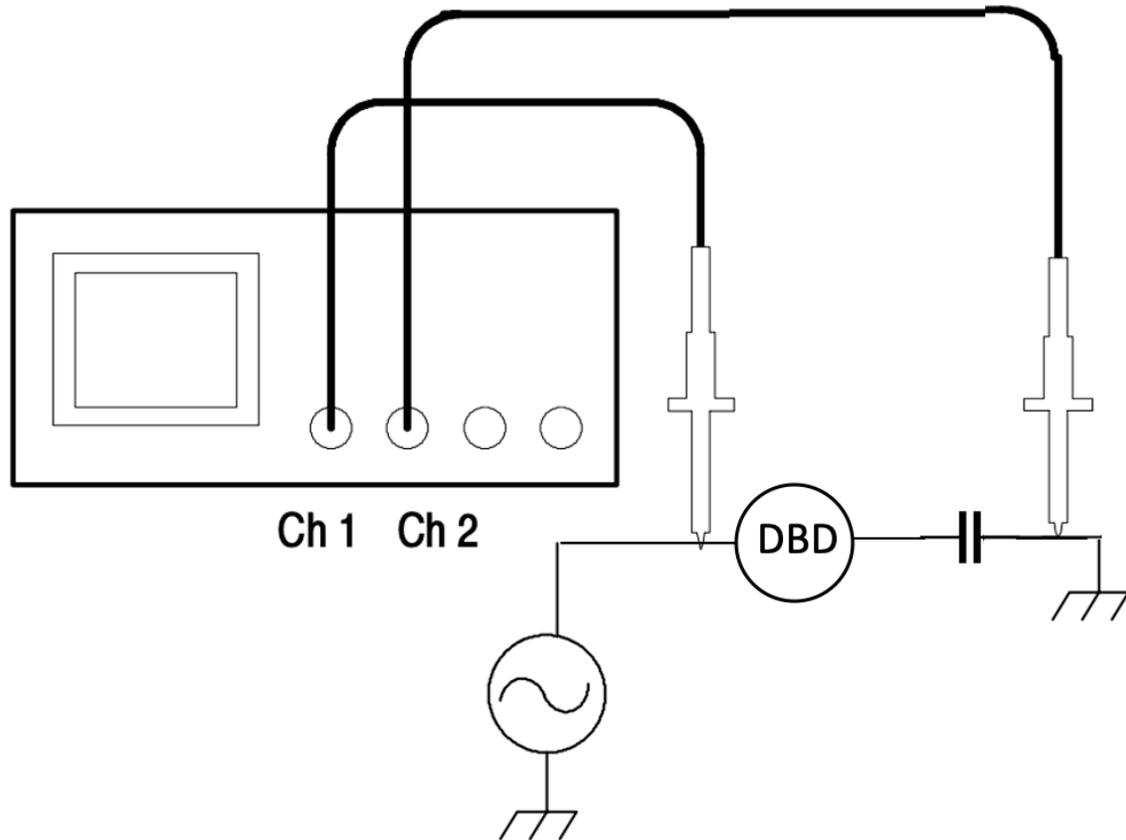


Figura 24: Diagrama de medición de voltaje con el osciloscopio.

Si se conectan dos entradas de voltaje de forma independiente a los canales del osciloscopio como los de la figura 24 y se miden ambos niveles de señal, se pueden generar figuras de Lissajous por la construcción geométrica producida por la superposición de las dos señales, y gracias a ello, la potencia eléctrica también puede ser calculada³².

2.1.7 Cámara de polymaq

Durante las pruebas de ignición del jet, entre las conexiones de la salida de la fuente y el electrodo, la temperatura se eleva mucho comparada a la del medio ambiente, por eso es importante reducir cualquier contacto posible con el usuario y también prevenirle una descarga eléctrica, por ello es vital evitar esta interacción mediante un molde. En la figura 17 se observa una cámara, la cual es capaz de aislar al usuario de la interacción interna eléctrica producida por la descarga, siendo posible entrar en contacto con la cámara y poder manipularla; esto se debe a las propiedades del material con el que está hecha, es un polietileno de ultra alto peso molecular (UHMW-PE) conocido como Poly-Maq 100 (polymaq), y debido a su nivel de resistencia a la abrasión y al impacto logra contener a la descarga eléctrica desde el electrodo hasta la salida del tubo de vidrio. El bajo coeficiente de

fricción con el que cuenta, en conjunto con la resistencia a la abrasión y el grado de dureza, produce una superficie autolubrificante y antiadherente que no supera ningún otro plástico, logrando tolerar las temperaturas durante la descarga.

<i>Propiedades</i>	<i>Polymaq</i>	<i>Unidades</i>
Resistencia a la Tensión, 73°F	3.050	psi
Módulo de Elasticidad a la Tensión, 73°F	120000	psi
Elongación a la Ruptura, 73°F	200	%
Dureza, Durometro, Escala Shore “D”, 73°F	D 68	-
Coefficiente de Fricción Dinámico (en seco vs. Acero)	0.1-0.14	-
Coefficiente de Expansión Térmica Lineal (de -40°F a 300°F)	1.1×10^{-4}	in/°F
Temperatura de servicio continuo en aire (valor máximo)	180	°F
Absorción de agua por inmersión, en 24h	0	% por peso

Tabla 4: Propiedades del material Polymaq.³³

Entre sus características, además de las reflejadas en la tabla anterior, se encuentra que es de amortiguación sonora, absorción de energía, nula absorción de líquidos y tiene propiedades dieléctricas y aislantes que sirven para fabricar partes que trabajan en condiciones de abrasión severas y con baja carga mecánica. Tiene excelentes propiedades dieléctricas, resistencia química, tan fácil de maquinar como la madera y su peso es 8 veces menor al del acero, facilitando la construcción del dispositivo utilizado en todas las pruebas hechas en el experimento³³.

2.1.8 Calibración de la salida del voltaje de la fuente

Para poder determinar los resultados del capítulo III, se calibró la fuente MINIPULS UNIVERSAL GBS ELEKTRONIK, esta cuenta con un monitor de voltaje estimado con una escala 1:3000 supervisada a través de una conexión BNC por un extremo del cable coaxial conectado al osciloscopio de fósforo digital de la serie TDS3000B marca Tektronix también con terminación BNC, arrojando valores por ese lado.

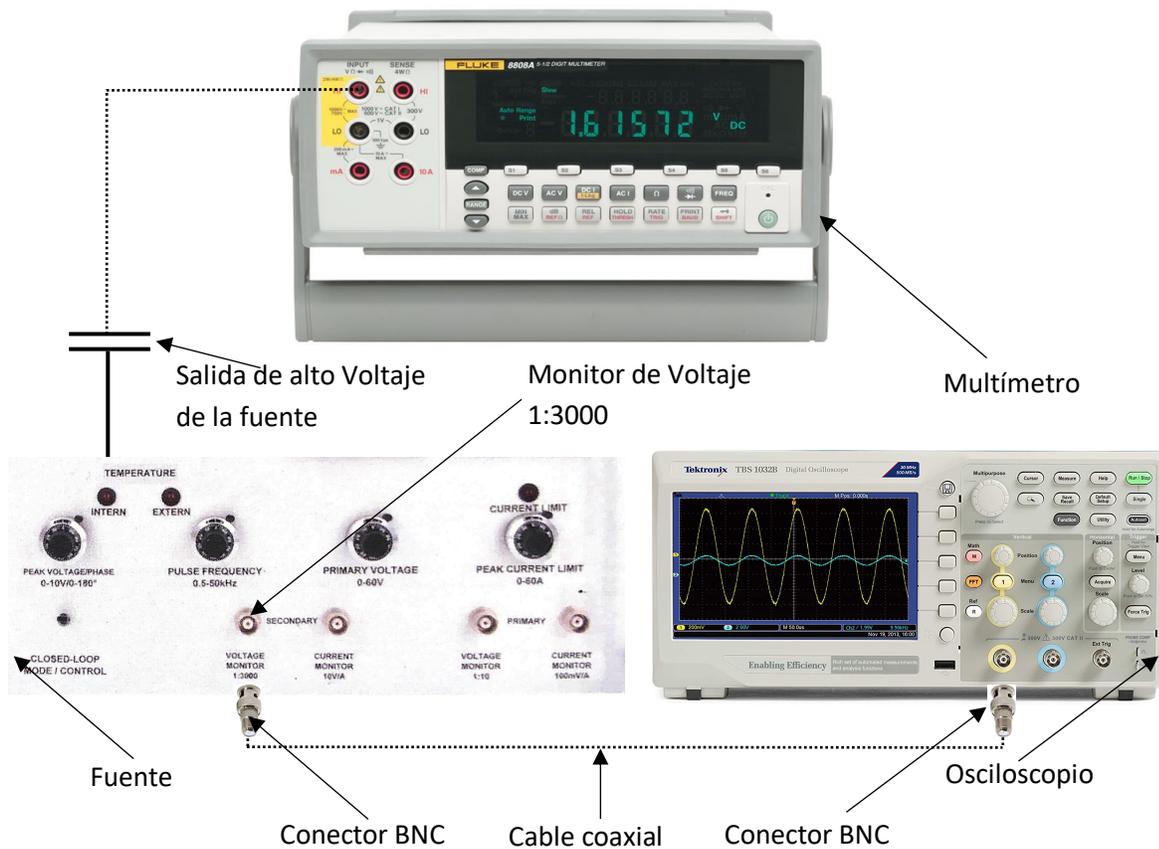


Figura 25: Diagrama de las conexiones entre Fuente-Osciloscopio y Fuente-Multímetro.

También se medirá el voltaje de salida de la fuente con un multímetro Fluke 8846A para poder compararlos entre sí y así, modelar el funcionamiento de la salida 1:3000 y estimar todos los valores del voltaje a lo largo del experimento únicamente con los datos proporcionados por la fuente. La figura 25 muestra un diagrama de las conexiones.

Capítulo 3: Resultados

3.1 Diagnóstico del voltaje

3.1.1 Calibración de la salida del voltaje de la fuente

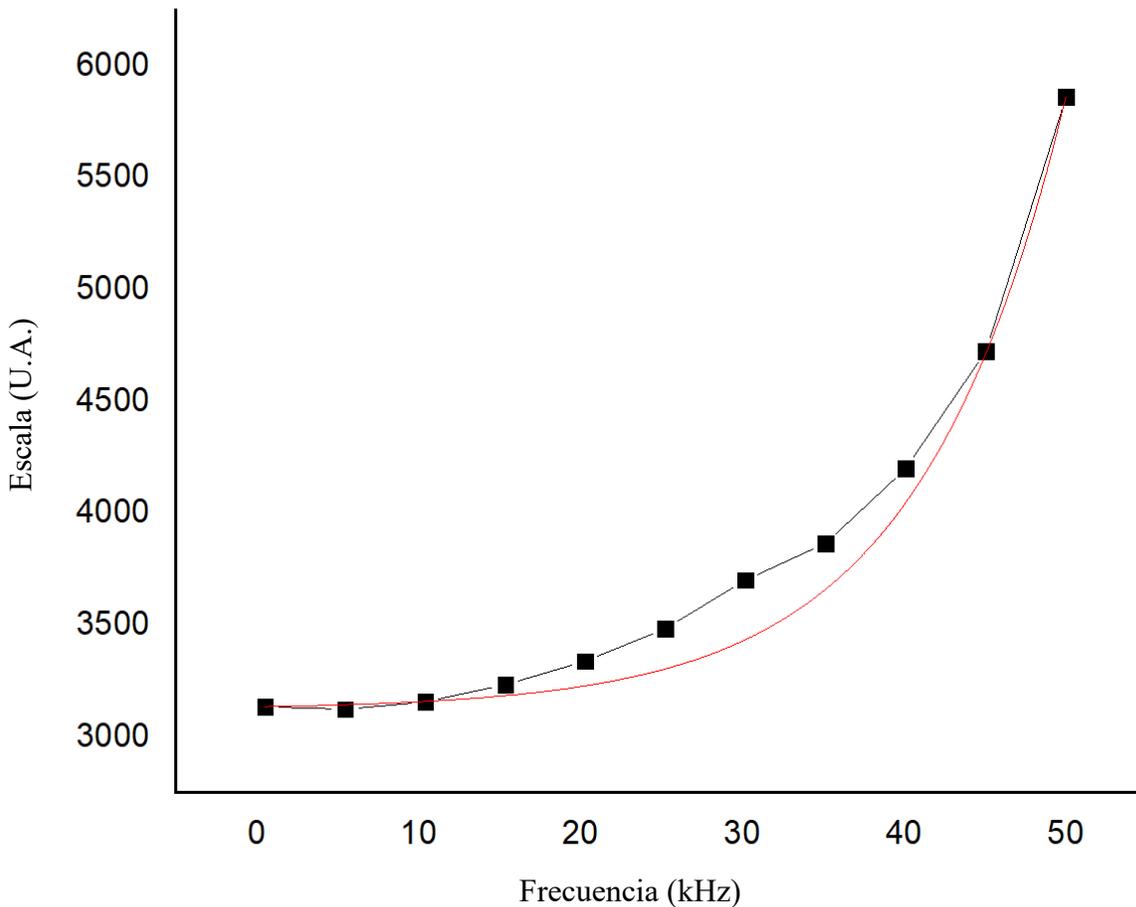
A lo largo de cada descarga, la fuente manda una salida de voltaje según la frecuencia, y ya que existen ciertos puntos de resonancia dadas por las FRA, la frecuencia necesita ser modificada para cada experimento y calcular dicho voltaje. Si este se mide directamente en la salida, creará un circuito en paralelo y afectará a todo el sistema, por lo que los valores deben ser calculados a partir del monitor de salida en la misma fuente descrito en el apartado 2.1.8 con una escala 1:3000, sin embargo, ésta variaba lo suficiente como para hacer un modelado de la función que describa el factor real de la salida de voltaje, dicho factor multiplicará el valor arrojado por el monitor, todo ello en función de la frecuencia usada.

A continuación, se muestra una tabla con el promedio de datos, obteniendo una escala media para cada vuelta de la perilla de la frecuencia, esta va de las 0-10 vueltas iniciando en 0.5Hz hasta los 50Hz.

<i>Frecuencia (Vueltas)</i>	<i>Frecuencia (Khz)</i>	<i>Escala</i>
0	0.5	3133.52
1	5.45	3122.67
2	10.4	3155.19
3	15.35	3232.35
4	20.3	3337.51
5	25.25	3483.79
6	30.2	3701.20
7	35.15	3865.22
8	40.1	4200.00
9	45.05	4724.92213
10	50	5862.83602

Tabla 5: Escala de Voltaje en función de la Frecuencia. Elaboración propia.

La columna 1 de la tabla anterior fue regulada vuelta por vuelta, mientras que con una regla de tres se calculó la segunda columna para comparar los datos en Hertz, a su vez fueron corroborados los valores con el osciloscopio. Finalmente, la tercera columna es un promedio de la escala que se debe usar según la frecuencia. Graficando la frecuencia en Hertz para el eje de las abscisas contra la escala para el eje ordenado, se obtiene:



Gráfica 1: Escala de Voltaje en función de la frecuencia.

La gráfica en color negro son los puntos medidos en cada prueba proporcionados por la tabla anterior. El mejor ajuste encontrado fue con una función exponencial dada por la curva en color rojo, ésta muestra un modelo dado por la expresión:

$$y = y_0 + Ae^{R_0x} \quad \text{ecuación (41)}$$

Sustituyendo los valores obtenidos, la ecuación anterior queda como:

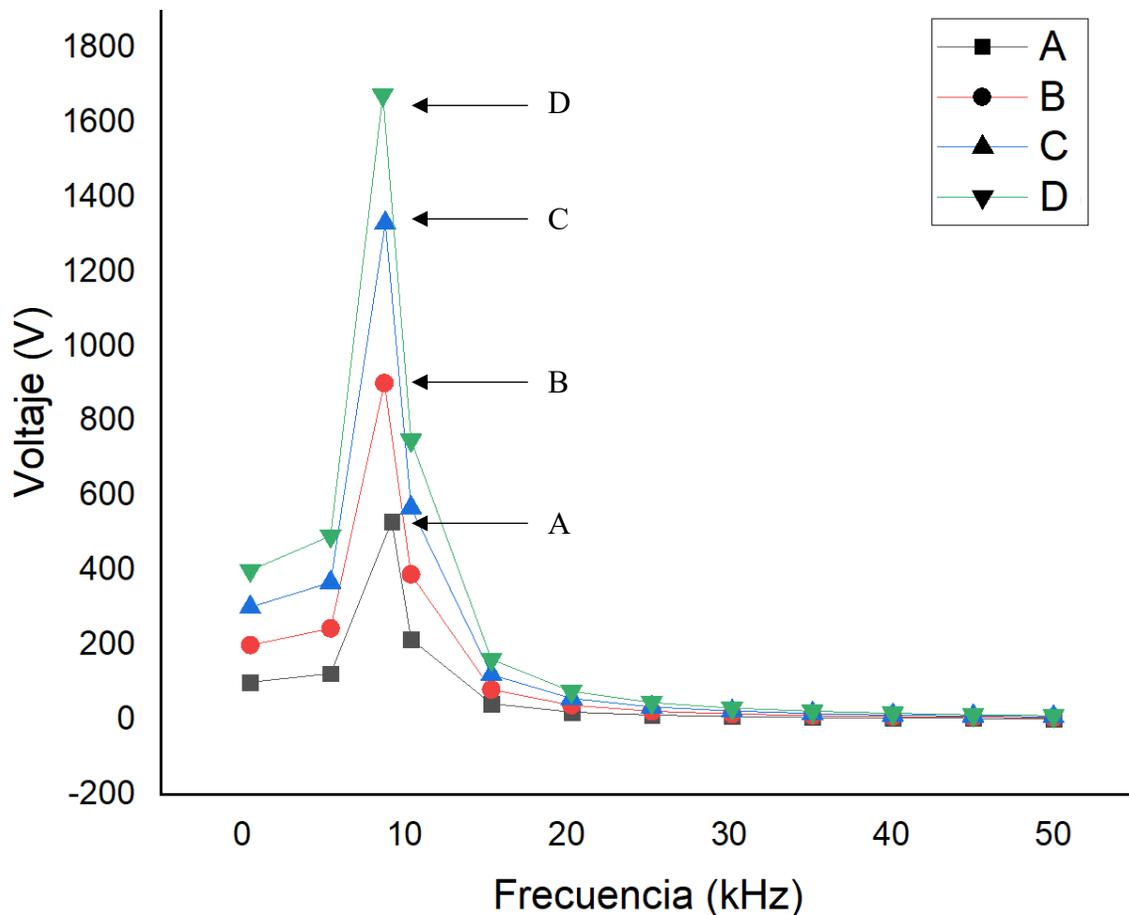
$$Escala = 3121.46 + 11.42e^{0.11f} \quad \text{ecuación (42)}$$

Donde "y" representa la escala a utilizar en función de f , siendo esta última la variable de la frecuencia.

3.1.2 Comportamiento de la fuente y sus puntos de resonancia

Con una fuente de alto voltaje como lo es MINIPULS UNIVERSAL GBS ELEKTRONIK en conjunto con un transformador tipo cascada se lograrán generar hasta 60kVpp mediante el control de 4 perillas en la fuente, una de ellas proporciona un aumento en el voltaje de forma lineal a una frecuencia constante, lo contrario a mantener fijo un valor de voltaje y mover la perilla relacionada con la frecuencia que ocasionará curvas de admitancia por un FRF.

Para determinar los puntos de resonancia ocasionados por el cambio en la frecuencia se realizaron cuatro pruebas con un voltaje inicial constante de: 100V, 200V, 300V, 400V. Para cada valor, se varió la frecuencia empezando desde 0.5Hz hasta los 50Hz, siendo los límites de la fuente. La gráfica a continuación muestra los resultados obtenidos.



Gráfica 2: Voltaje en función de la frecuencia en la fuente para 4 pruebas con valores iniciales para las distintas pruebas, de: A=100V, B=200V, C=300V y D=400V.

Se pueden apreciar en la gráfica anterior cuatro puntos importantes, a lo largo del funcionamiento de la fuente, cada vez más altos conforme aumenta el voltaje. Las coordenadas son:

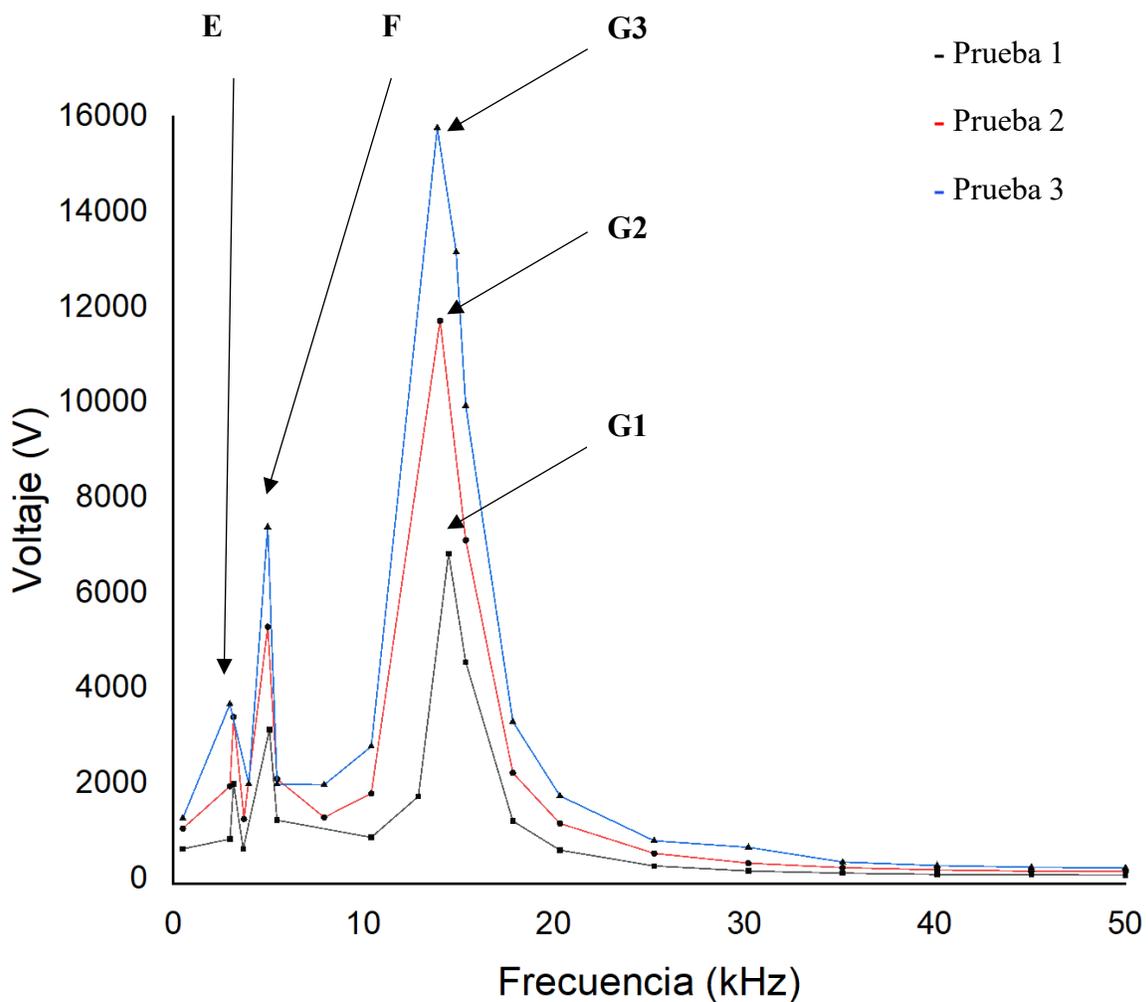
<i>Punto</i>	<i>Coordenada (kHz, V)</i>
A	(9.912, 531.3)
B	(8.7665, 902.3)
C	(8.816, 1330.9)
D	(8.6675, 1674.7)

Tabla 6: Puntos de resonancia para la misma prueba con 4 valores de voltaje iniciales A=100V, B=200V, C=300V y D=400V. Elaboración propia.

Cabe aclarar que dichos puntos fueron obtenidos únicamente con la fuente funcionando, sin generar algún tipo de descarga o estar conectada al dispositivo del jet. Las coordenadas fueron obtenidas por la medición del voltaje y frecuencia a través del monitor de la fuente 1:3000 conectada a un osciloscopio.

3.1.3 Comportamiento de la descarga y puntos de resonancia del jet

Es importante determinar los valores máximos de voltaje que puede alcanzar la descarga en el jet, ya que como sucedió en el comportamiento de la fuente por si sola, se alcanzaron puntos de resonancia que probablemente se repitan con una conexión con el dispositivo. Se hicieron tres pruebas para valores de voltaje fijos con cambios en la frecuencia, esta vez con el dispositivo conectado a la fuente y el jet funcionando; la gráfica a continuación lo describe.



Gráfica 3: Voltaje en función de la frecuencia en la descarga del jet para 3 pruebas con distintos voltajes: A, B, C

Se obtienen los tres puntos más importantes donde se está generando la resonancia:

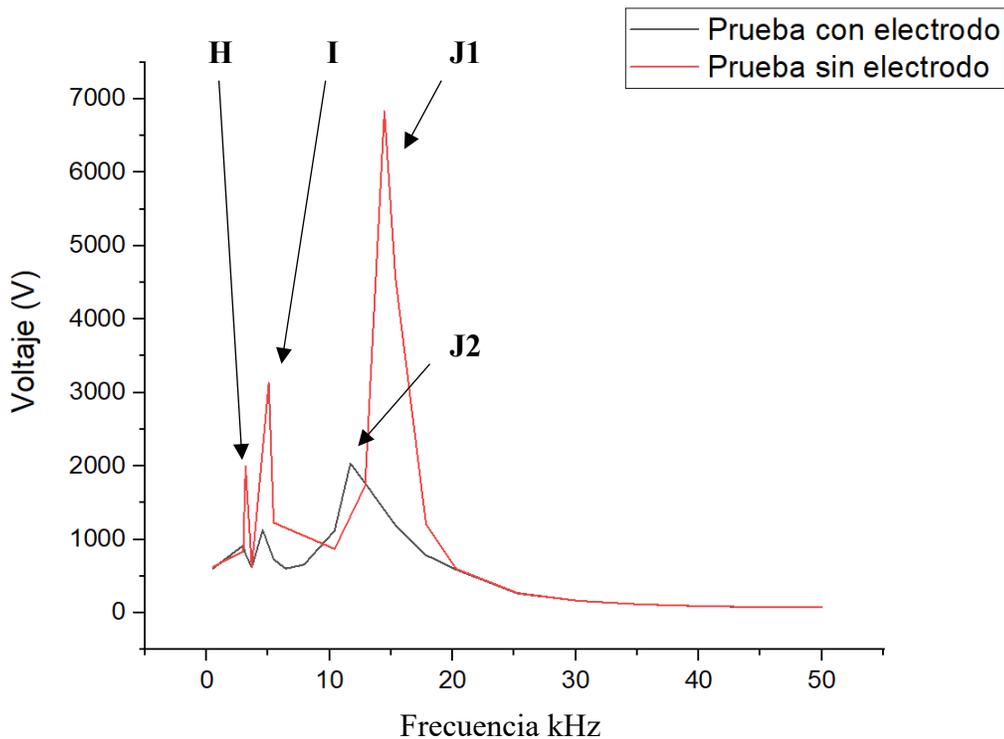
<i>Punto</i>	<i>Coordenada (kHz, V)</i>
G3	(14.46, 6830.96)
G2	(14.01, 11717.20)
G1	(13.87, 15773.17)

Tabla 7: Coordenadas de los puntos de resonancia. Elaboración propia.

Muy cerca de los 14kHz se alcanza el punto más alto alcanzado para valores constantes de voltaje.

3.1.4 Comportamiento de la descarga y puntos de resonancia del jet con y sin electrodo externo.

Comparando los resultados de la sección 3.1.3 en la prueba 1, donde no había presencia de un electrodo externo, con otra prueba con los mismos parámetros, pero añadiendo un electrodo externo (ánodo) como el de la figura 14, se podrá determinar el cambio en las curvas de admitancia.



Gráfica 4: Comparación del voltaje en función de la frecuencia, para pruebas con y sin electrodo.

Nuevamente se ve en la gráfica anterior presencia de puntos de resonancia, más pequeños y ligeramente desplazados cuando hay un ánodo en la configuración, dichos picos máximos se encuentran en:

<i>Punto</i>	<i>Coordenada (kHz, V)</i>
J1	(14.46, 6830.96)
J2	(11.69, 2036.71)

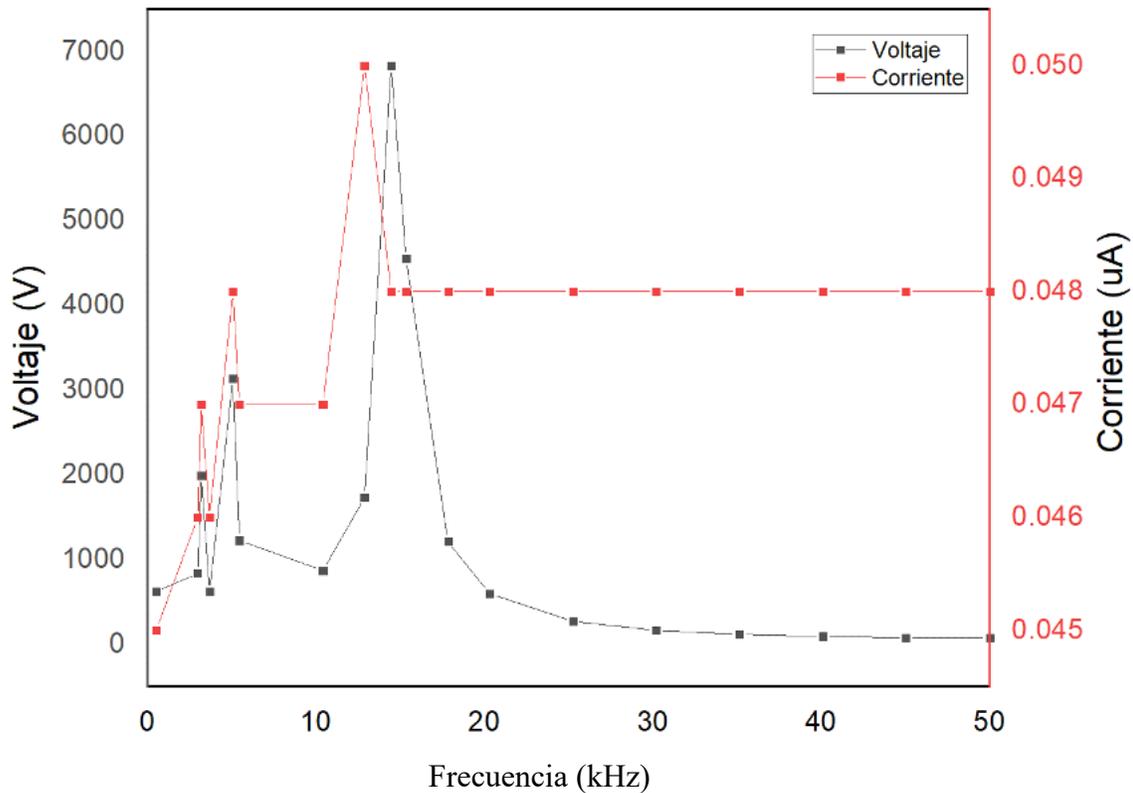
Tabla 8: Coordenadas de frecuencia y voltaje. Elaboración propia.

La tabla anterior describe un desfase de 2.772 kHz en la frecuencia aproximadamente, mientras que el voltaje aumenta con una proporción de 1:3 para una descarga sin y con electrodo externo respectivamente.

3.2 Diagnóstico de la corriente eléctrica del jet

3.2.1 Puntos de resonancia en la corriente

Se hace una comparación de los puntos de resonancia en la corriente y el voltaje de la prueba 1 visto en la sección 3.1.3.



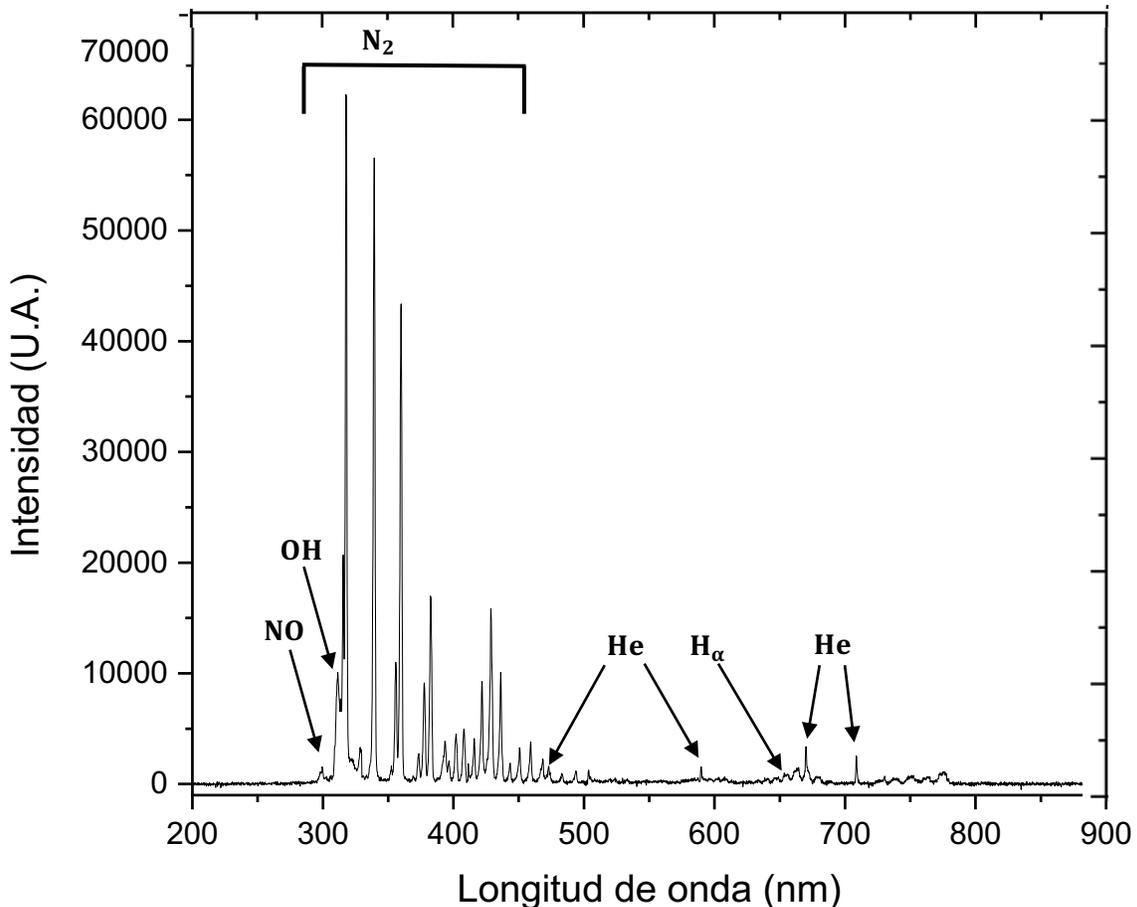
Gráfica 5: Gráfica de voltaje y corriente en función de la frecuencia.

Con base en los cálculos realizados sobre el voltaje en el jet de plasma, se llevó a cabo una comparación entre el comportamiento del voltaje y corriente con el objetivo de determinar los puntos de resonancia en ambos parámetros. Los resultados muestran un comportamiento similar en la corriente y el voltaje, ya que ambos están relacionados con la frecuencia. La gráfica 5 indica tres picos en posiciones similares debido a la resonancia, lo que sugiere un comportamiento coherente entre el voltaje y la corriente.

3.3 Diagnóstico de Espectros Ópticos de Emisión

3.3.1 Análisis de especies generadas en el jet por OES

Para determinar la composición elemental de una amplia gama de materiales producidos en el jet con gas Helio, se tomaron OES con un espectrómetro marca Ocean Optics modelo HR4000, y así obtener las propiedades de la luz provenientes de la emisión del plasma y adquirir las líneas atómicas características.

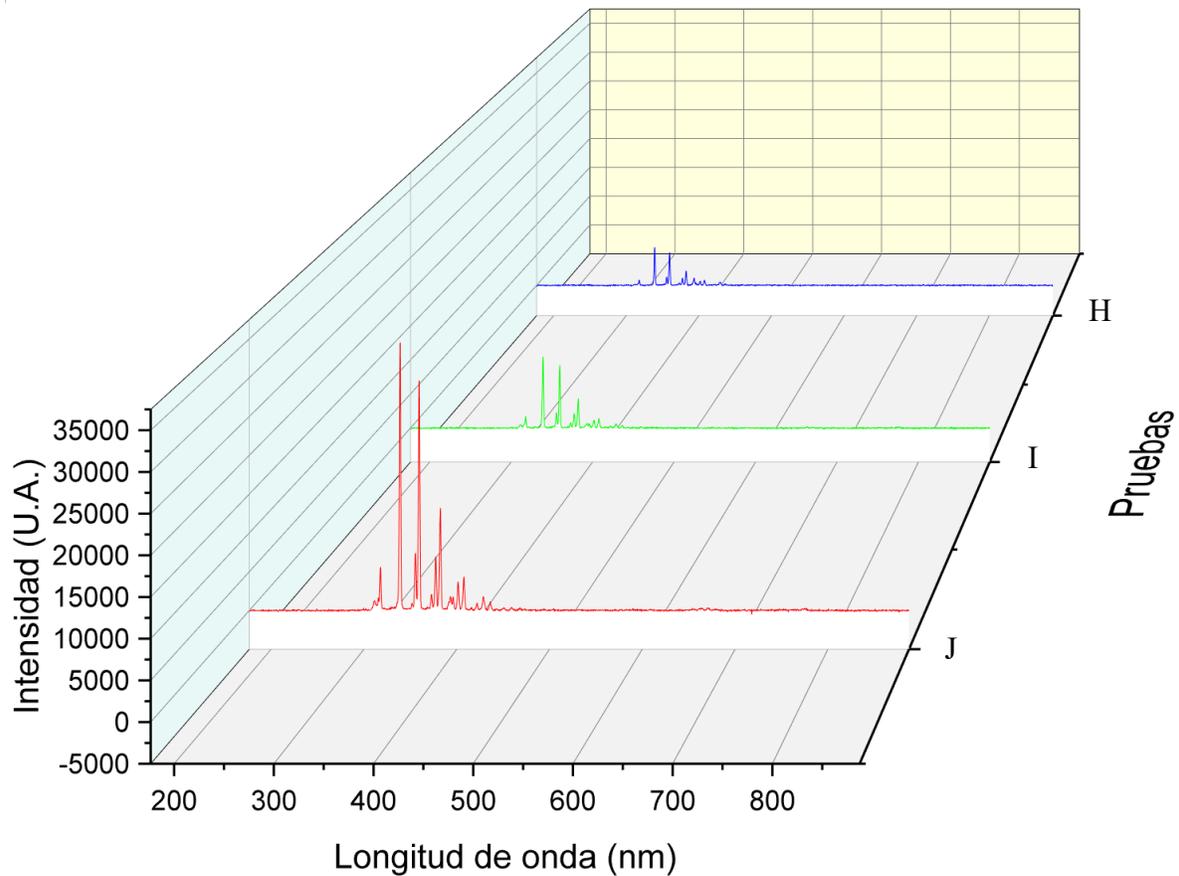


Gráfica 6: Espectro óptico de emisión del Jet He a 30PSIG (libras por pulgada cuadrada por sus siglas en inglés).

La gráfica anterior muestra puntos importantes de longitudes de onda, para describirlos se consultó en la base de datos del NIST³⁴ y libros³⁵. Se encontraron picos característicos correspondientes a He, además de O, N₂, OH, y H, entre otros; cabe aclarar que el jet está en constante interacción con el aire como medio.

3.3.2 OES en los puntos de resonancia

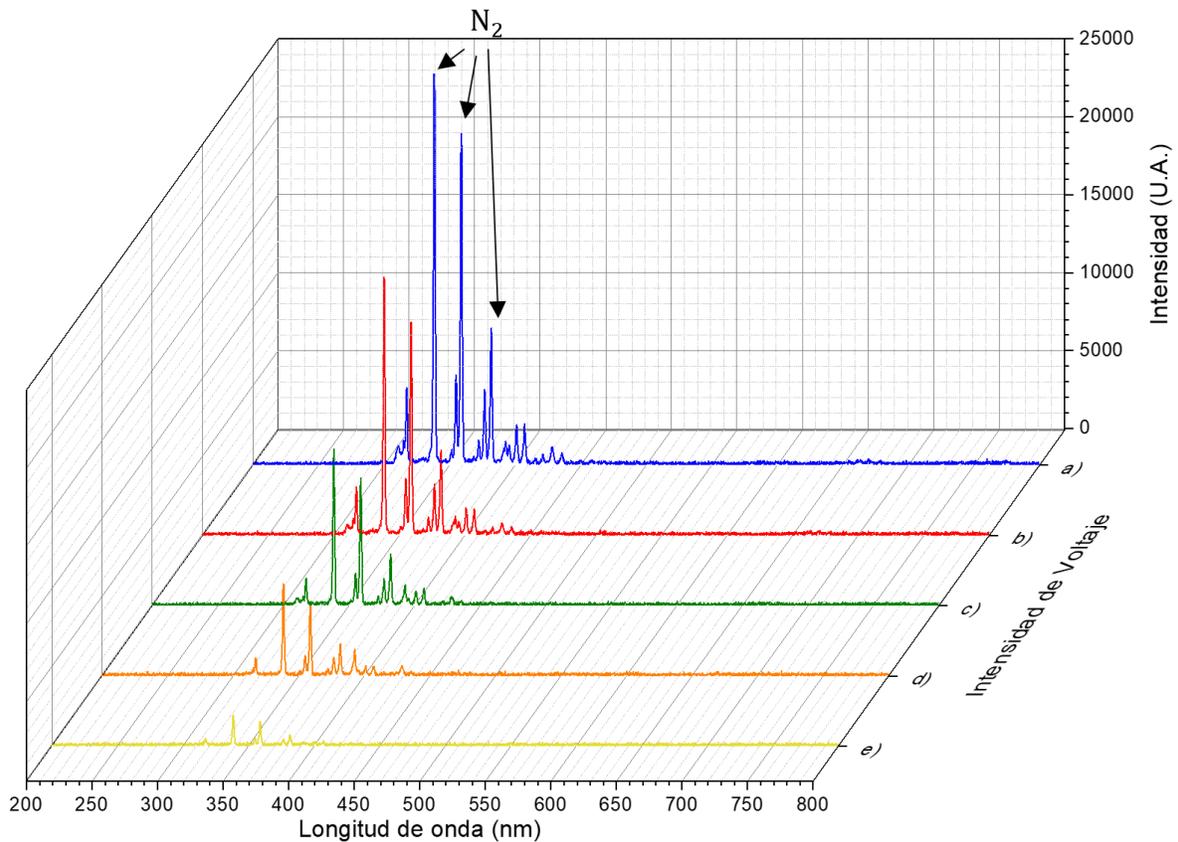
Una vez determinados los puntos de resonancia generados durante la descarga sin electrodo externo vistos en el apartado 3.1.4, se tomaron espectros de emisión en los tres picos H, I, J, para poder comparar las especies que arrojaría el jet durante su funcionamiento. La gráfica 7 muestra un comportamiento en la intensidad de forma ascendente ante el aumento de voltaje, pues dichos picos dependían de ello.



Gráfica 7: OES de los puntos H, I, J de la gráfica 4.

3.3.3 Espectros de emisión por cambio en el voltaje.

Para determinar la composición elemental de una amplia gama de materiales se tomaron (OES) con un espectrómetro marca Ocean Optics modelo HR4000, y así obtener las propiedades de la luz provenientes de la emisión del plasma y adquirir las líneas atómicas características.

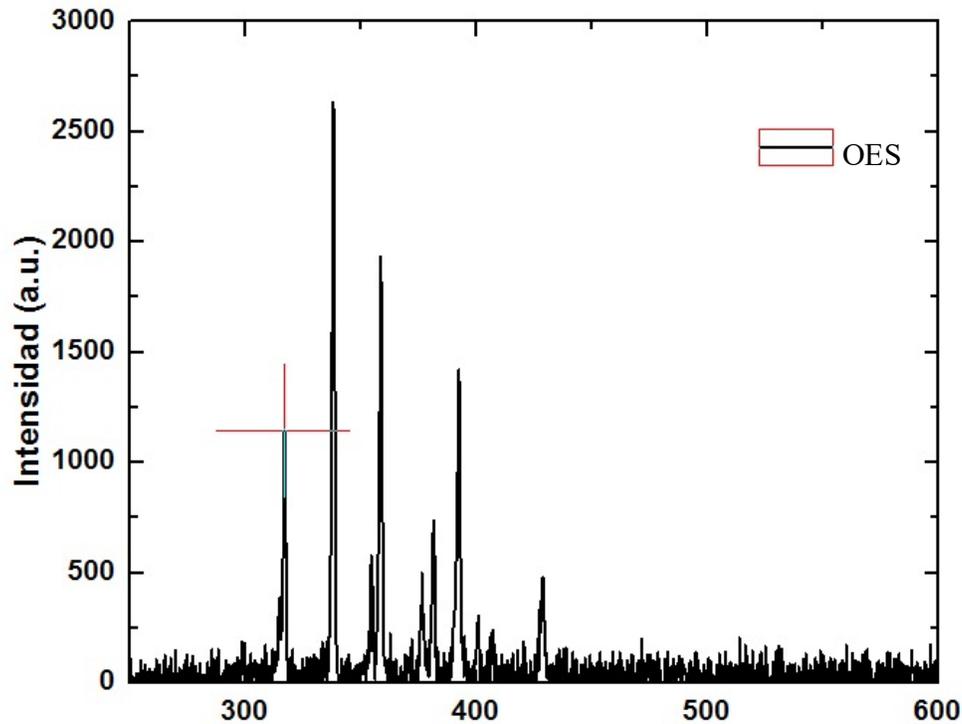


Gráfica 8: Espectros ópticos de emisión del jet He a diferente porcentaje de intensidad de voltaje:
a) 100%, b) 80%, c) 60%, d) 40%, e) 20%.

Una vez que hay presencia de plasma en el dispositivo, se tomaron OES durante toda la fase estructural del vidrio, donde 0% es el voltaje de rompimiento y 100% la ruptura del tubo de vidrio, esto, para poder comparar las especies generadas, las cuales no incrementaron en cantidad, solo en intensidad, ya que todas las líneas de longitud de onda coinciden para todos los espectros.

3.3.4 OES del jet con una mezcla de Helio y aire

Durante todas las pruebas hechas en el dispositivo, el gas Helio, fue el principal suministro de éste, sin embargo, al no estar aislado del medio, estuvo en contacto directo con el aire, por lo que se hizo una prueba adicional de descarga. Esta vez, el jet contaría con una mezcla de aire y Helio en la entrada directa del gas del prototipo (ver figura 17), todo ello para poder comparar un espectro de emisión que denote el cambio de las especies generadas en futuras pruebas en el dispositivo y la posible contaminación de aire.



Gráfica 9: OES del jet con una mezcla de gas Helio y aire.

Lo que se observa en la gráfica 9, es el espectro de emisión que concuerda con la segunda órbita del Nitrógeno, el Helio se acabó y solo sirvió de arrastre, por los que las principales especies encontradas fueron por el aire.

3.4 Diagnóstico en la dimensión del jet

3.4.1 Dimensión por cambio en el voltaje.

Para formar un bosquejo del comportamiento de las dimensiones del jet durante su ignición, sustentación y aumento de acuerdo con la subida de voltaje controlado por la fuente de alto voltaje, se tomaron fotografías a lo largo del proceso, con una cámara réflex digital marca Nikon en la misma posición para no variar la escala situada en la parte posterior al prototipo.

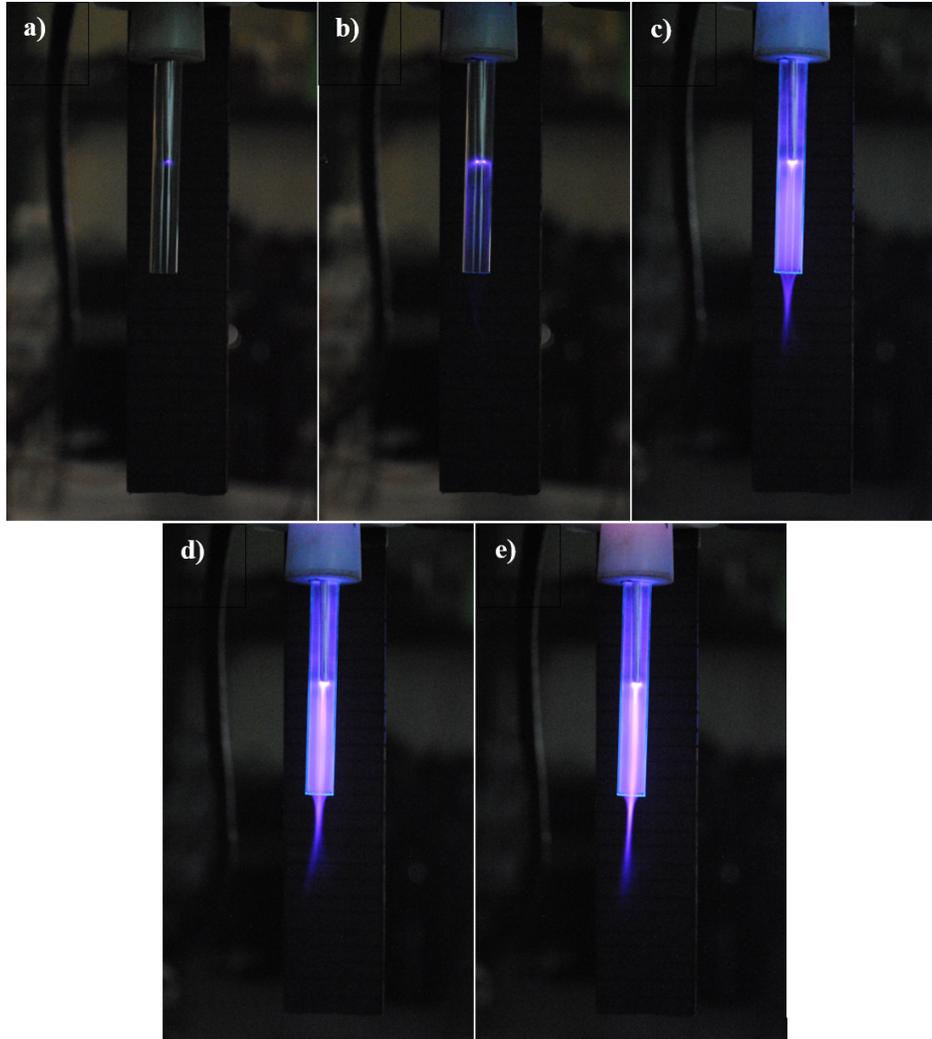
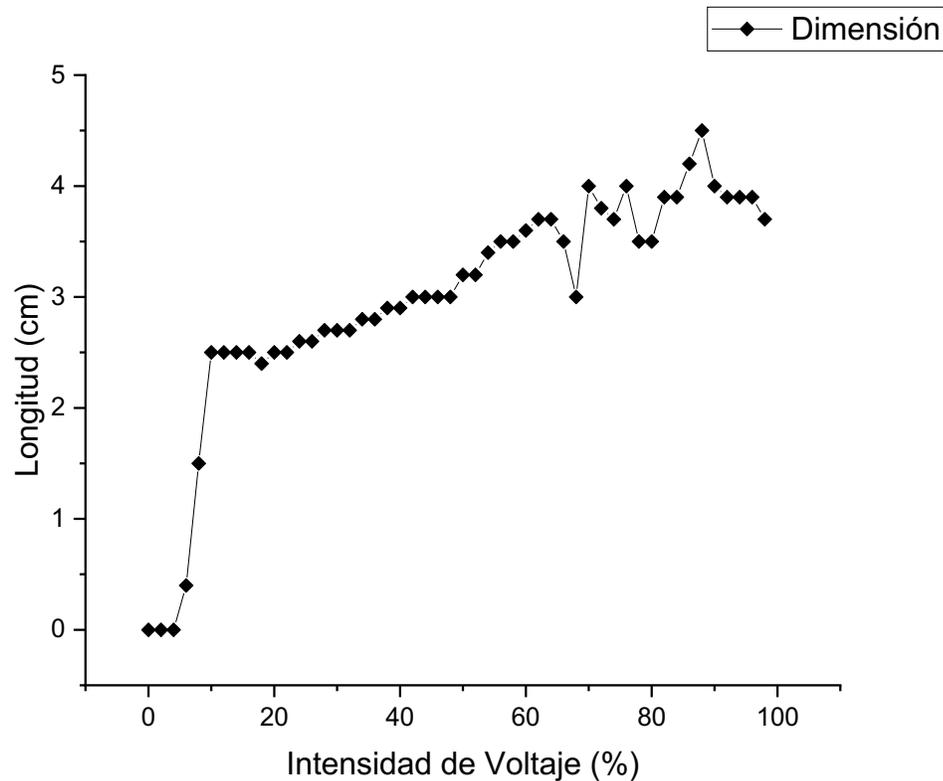


Figura 16: Evolución de las dimensiones del jet con el aumento en el voltaje.

Las fotografías de la figura 16 atienden a la visualización de la creación del jet una vez que la válvula de gas está abierta para permitir el flujo de gas He a 30 PSIG, y que el voltaje se suministra sobre el electrodo del prototipo. Una vez llegado al punto de ruptura del voltaje, el plasma comienza a llenar la cámara cilíndrica de vidrio dentro del primer cinco por ciento de sus capacidades por la intensidad de voltaje, construyendo rápidamente un jet superado ese porcentaje, para posteriormente crecer de forma continua y alcanzar un pico máximo al 88% de la capacidad del vidrio con 4.5cm de longitud del jet aproximadamente, y finalmente desestabilizarse y difundirse sin lograr un crecimiento considerable hasta quebrar el material de la cámara cilíndrica.

3.4.2 Dimensión del jet en función de la capacidad estructural del dispositivo por el aumento de voltaje.

Para analizar todo el comportamiento del jet, la siguiente gráfica describe el proceso completo, tomando como punto inicial la ignición del plasma a un 0% de evolución, con la consideración que el jet se genera una vez que la estela de luz sobresale del tubo de vidrio, y un 100% dadas las propiedades estructurales del vidrio justo antes de fracturarse por el voltaje.

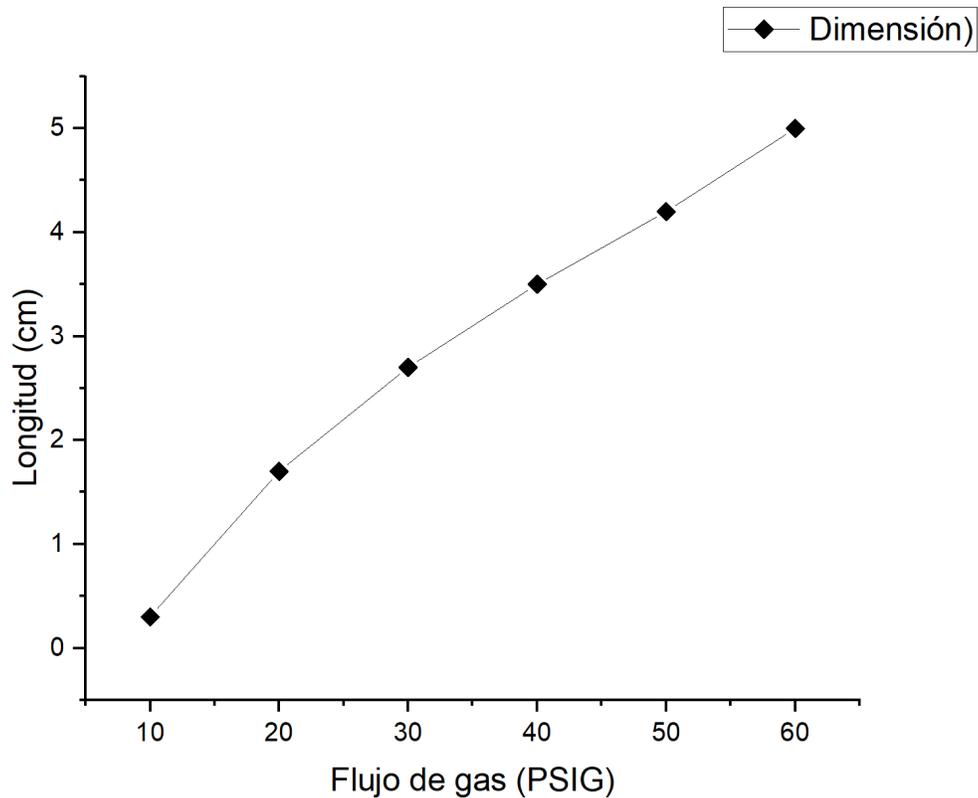


Gráfica 10: Gráfica de la dimensión alcanzada por el jet en función de la intensidad del voltaje.

La gráfica 10 muestra una estela de 0cm de jet cuando no hay voltaje suministrado por la fuente; tiene que pasar un porcentaje cercano al 5% para notar un cambio ascendente en la dimensión de este.

3.4.3 Dimensión del jet en función de la variación de flujo de gas

Finalmente, se busca observar el comportamiento de la dimensión en la estela de luz cuando se suministra mayor flujo de gas directamente al dispositivo. En la gráfica 11 se aprecian 6 medidas de la longitud del jet a flujos de gas de 10, 20, 30, 40, 50 y 60 PSIG.



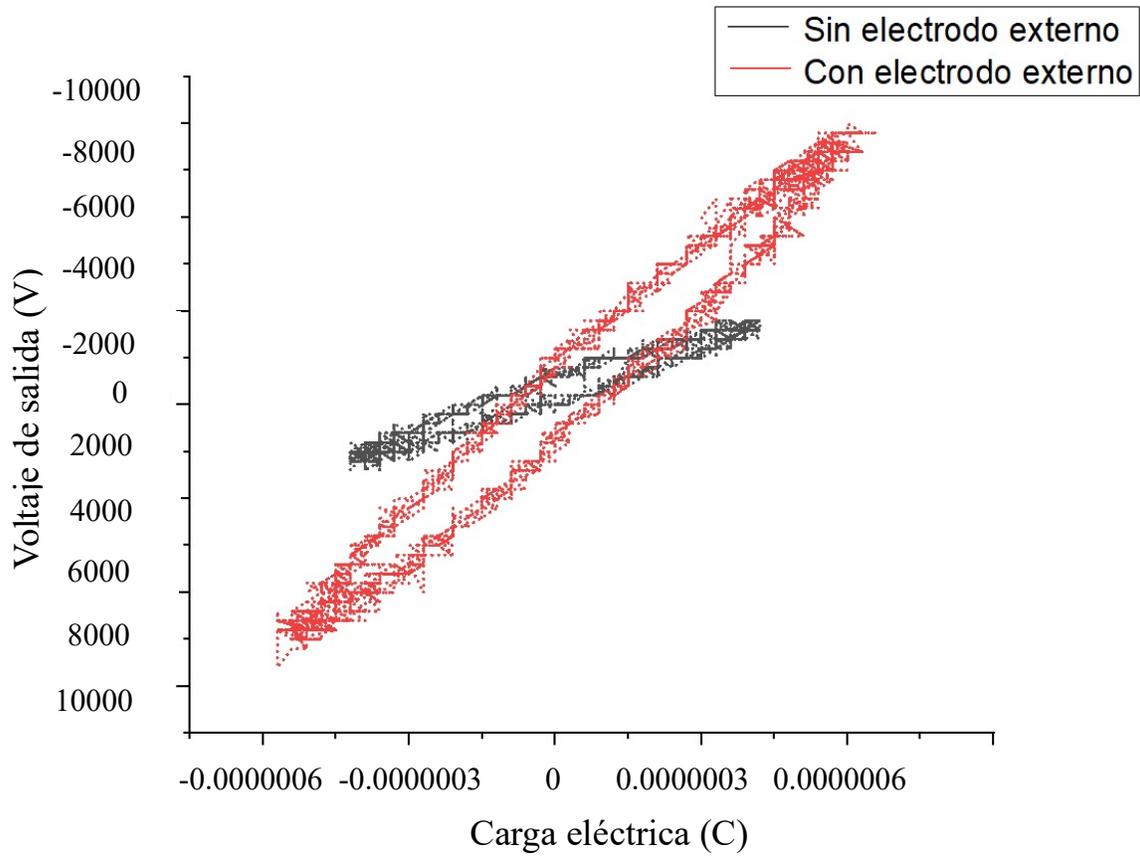
Gráfica 11: Longitud de la estela alcanzada por el jet a distintos flujos de gas.

Es importante aclarar que, para poder observar el comportamiento únicamente por el aumento del gas, el voltaje se mantuvo constante para no intervenir las medidas obtenidas.

3.5 Diagnóstico de la potencia eléctrica

3.5.1 Comparativa de las figuras de Lissajous para el dispositivo con y sin electrodo externo

Una vez que las pruebas hechas en el dispositivo denotaron un importante cambio cuando se contaba con un electrodo externo, se implementó también una gráfica que pudiera comparar los valores de la potencia eléctrica. La siguiente gráfica muestra las figuras de Lissajous obtenidas:



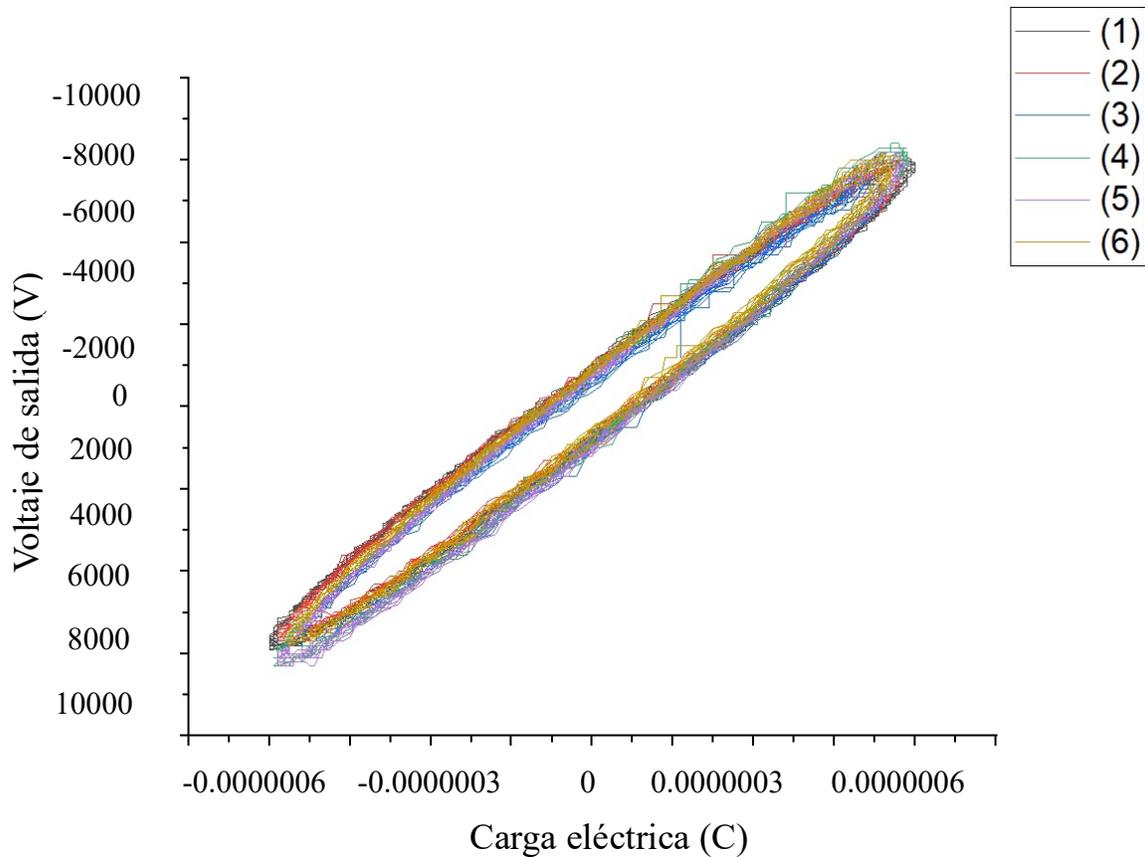
Gráfica 12: Comparación de figuras de Lissajous para una descarga en el dispositivo con y sin electrodo externo.

Las figuras de Lissajous de la gráfica anterior se obtuvieron con todos los parámetros fijos, por un lado, una prueba con electrodo externo y otra, sin él, con un área bajo la curva de 10.71W y 2.76W respectivamente.

3.5.2 Potencia eléctrica de acuerdo con el cambio en el flujo de gas

Si ambas conexiones de entrada y salida de Voltaje se conectan al osciloscopio y se grafican se obtendrán las figuras de Lissajous; a su vez, si se calcula el área bajo la curva se obtendrá la potencia eléctrica en función de la capacitancia.

Para esta segunda comparativa de figuras, se realizaron seis repeticiones con un voltaje constante, a 9157.42V y variando el flujo de gas Helio, controlado por un flujómetro, obteniendo la siguiente gráfica:

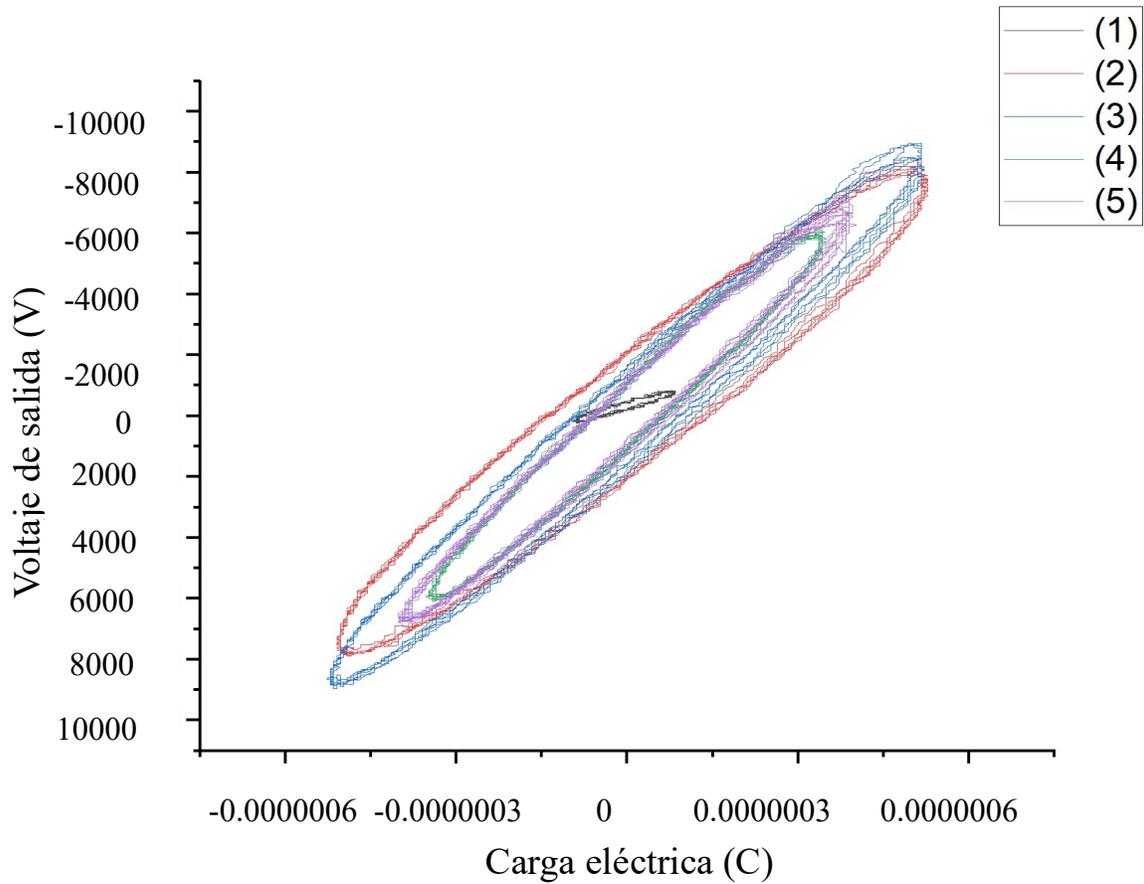


Gráfica 13: Comparación de figuras de Lissajous a distintos flujos de gas: 10, 20, 30, 40, 50, 60 PSIG para las pruebas 1, 2, 3, 4, 5 y 6 respectivamente.

La gráfica anterior muestra un desarrollo de las seis repeticiones independientes a 10, 20, 30, 40, 50, 60 PSIG y fueron realizadas con un valor fijo de 16016V.

3.5.3 Potencia eléctrica de acuerdo con el cambio en el voltaje

Al igual que la variación del flujo del gas, se desea comparar la evolución de la potencia eléctrica, esta vez, variando el voltaje, empezando con un voltaje de 1909.74V, 4201.43V, 9157.42V, 12202.74V y 16016.10V, arrojando las pruebas del 1-5 respectivamente, todas se realizaron a un flujo constante de 30PSIG de salida de gas Helio por el flujómetro. La siguiente gráfica muestra los resultados:



Gráfica 14: Comparación a distintos voltajes de descarga de figuras de Lissajous, pruebas del 1-5.

La prueba 1, mostró las primeras señales de generación del jet, mientras que en la prueba 5, la estela del jet realiza conexiones directas con el usuario y el resto del equipo, además comienza a verse más difusa y una separación de distintas líneas del jet.

El área bajo la curva para las distintas pruebas en función del periodo fue de: 2.14, 116.77, 101.12, 51.23, 69.98 W respectivamente para cada valor de voltaje fijado.

Capítulo 4: Conclusiones

Es importante destacar que se llevó a cabo un experimento en el que se investigó la dinámica de un jet de plasma. Para ello, se midió el tamaño del jet de plasma, se calcularon puntos de resonancia, se realizaron mediciones de voltaje con y sin electrodo externo y se comparó la potencia eléctrica. Además, se analizaron los espectros ópticos de emisión.

A continuación, se detallarán los resultados obtenidos en cada una de estas áreas y se formularán conclusiones sobre los mismos.

4.0.1 Calibración de la salida del Voltaje de la fuente

El monitoreo del voltaje generado por la fuente se realiza mediante la medición de su salida. En un contexto donde la frecuencia se mantiene constante durante el experimento, se espera que la escala de medición del voltaje muestre un comportamiento lineal. Es decir, si se aumenta la amplitud de la señal de entrada, la amplitud de la señal de salida también aumentará proporcionalmente.

Sin embargo, si se requiere cambiar la frecuencia durante el experimento, la escala de medición del voltaje ya no será lineal. En este caso, se espera un comportamiento exponencial, lo que significa que la relación entre la amplitud de la señal de entrada y la amplitud de la señal de salida no será proporcional, sino que estará determinada por una función exponencial. Esto puede requerir un ajuste en el monitoreo del voltaje para tener en cuenta los cambios en la frecuencia y obtener mediciones precisas.

4.0.2 Comportamiento de la fuente y sus puntos de resonancia

En el monitoreo de la salida de voltaje de una fuente, es común encontrar picos de resonancia. Estos picos se deben a la interacción entre la fuente y el aparato o descarga que se está utilizando. Por tanto, el punto de resonancia varía dependiendo del aparato o descarga que se esté utilizando. Sin embargo, es posible determinar un punto de resonancia para la fuente por sí sola. En este caso, se encuentra que la fuente tiene un punto de resonancia cercano a las 9kHz. Este hallazgo es relevante para el monitoreo de la salida de voltaje de la fuente, ya que permite una mejor comprensión de su comportamiento y, por lo tanto, una mayor eficiencia en su utilización.

4.0.3 Comportamiento de la descarga y puntos de resonancia del jet

Para este apartado, se realizó la conexión de la fuente al aparato de descarga, que consiste en un jet de plasma producido con gas helio a presión atmosférica. Al observar los resultados

obtenidos, se encontró que el jet de plasma alcanzó un pico máximo de voltaje a una frecuencia comprendida entre los 14-15kHz, con tres puntos promedio de resonancia: 3kHz, 5kHz y 14.5kHz.

Estos resultados sugieren que la frecuencia de la fuente influye en la formación y el comportamiento del jet de plasma, y que la resonancia puede jugar un papel importante en el aumento de la intensidad del voltaje. Es importante señalar que estos hallazgos son esenciales para la comprensión de los procesos físicos y electrónicos que ocurren en los jets de plasma, y pueden ser útiles para el diseño y desarrollo de nuevos aparatos y tecnologías en este campo.

En conclusión, este estudio aporta nuevos conocimientos sobre el comportamiento de los jets de plasma y su relación con la frecuencia de la fuente, y proporciona información valiosa para futuras investigaciones en este campo.

4.0.4 Comportamiento de la descarga y puntos de resonancia del jet con y sin electrodo externo.

La adición de un electrodo externo en el jet de plasma con Helio a presión atmosférica produjo una desviación hacia la izquierda en los puntos de resonancia, con un desfase aproximado de 2.772 kHz en la frecuencia. Sin embargo, a pesar de ser más grandes en términos de voltaje, el número de picos de resonancia se mantuvo en tres. La adición del electrodo externo también condujo a un aumento significativo en el voltaje, con una proporción de aproximadamente 1 a 3 en comparación con la descarga sin un electrodo externo. Estos resultados sugieren que la adición de un ánodo tiene un impacto significativo en la frecuencia y magnitud de los picos de resonancia en el aparato de descarga jet.

4.0.5 Puntos de resonancia en la corriente

La comparación del comportamiento de voltaje y corriente en el jet de plasma muestra una similitud en la posición de los tres picos debidos a la resonancia. Este análisis permitió concluir que los resultados obtenidos indican que la resonancia juega un papel importante en la dinámica del voltaje y corriente en el jet de plasma, y que la relación entre ambos debe ser considerada en futuros estudios en este ámbito.

4.0.6 Análisis de especies generadas en el jet por OES

En comparación con una descarga de barrera dieléctrica, los resultados obtenidos en el experimento con el jet de plasma muestran una mayor complejidad en cuanto a la composición elemental de los materiales producidos en el jet. Mientras que, en una DBD, la composición elemental se puede limitar a pocos elementos, en el jet se encontraron una amplia gama de elementos, como He, O, N, OH, H, entre otros.

Esto se debe a que el jet está en constante interacción con el aire, lo que permite una mayor producción de materiales y una mayor complejidad en su composición elemental. Además, al utilizar el espectrómetro de emisión óptica, se pudo obtener información precisa sobre la composición elemental y las propiedades de la luz provenientes de la emisión del plasma, permitiendo una caracterización más completa de los materiales producidos en el jet.

Los resultados obtenidos en el experimento muestran una mayor complejidad en cuanto a la composición elemental de los materiales producidos en comparación con las DBD, lo que demuestra la importancia de utilizar técnicas avanzadas de caracterización para una mayor comprensión de los materiales producidos.

4.0.7 Espectro óptico de emisión en los puntos de resonancia

Análisis de los resultados revelaron que los picos característicos de He, O, N₂, OH y H entre otros, estaban presentes en los espectros. Durante la medición de los tres puntos de resonancia, se observó un aumento en la intensidad de los picos en relación con el aumento del voltaje. Estos resultados sugieren que la resonancia tiene un impacto en la intensidad de la emisión del plasma más no en las especies generadas.

4.1.8 Espectro óptico de emisión por cambio en el voltaje

En este experimento se demostró que a medida que se aumenta el voltaje en el jet de plasma, también se aumenta la intensidad de los picos correspondientes a los elementos identificados en la gráfica del espectro óptico de emisión. Esto sugiere que la intensidad de la emisión del plasma está directamente relacionada con el valor del voltaje aplicado.

4.0.9 Espectro óptico de emisión del jet con una mezcla de Helio y aire

En una prueba adicional en el dispositivo, se mezcló aire y helio en la entrada de gas para observar el cambio en la composición de las especies generadas y para determinar la posible contaminación de aire en futuras pruebas en el dispositivo. Los resultados mostraron que el helio se consumió y actuó como un arrastre, mientras que las especies principales encontradas fueron provenientes del aire. Esto sugiere que en futuras pruebas es importante considerar y controlar la posible contaminación del aire para obtener una correcta identificación de las especies generadas.

4.0.10 Dimensión por cambio en el voltaje.

A partir de las fotografías tomadas durante el proceso de formación del jet de helio, se puede observar que el jet se forma cuando el gas He es liberado a 30 PSIG y se suministra el voltaje sobre el electrodo del prototipo. La formación del plasma comienza cuando se alcanza el punto de ruptura del voltaje y rápidamente se construye el jet en la cámara cilíndrica de vidrio. Al alcanzar un pico máximo en el 88% de la capacidad de la cámara cilíndrica, el jet comienza a desestabilizarse y difundirse hasta quebrar el material de la cámara.

Se puede ver que la formación y crecimiento del jet está directamente relacionado con la intensidad del voltaje suministrado y la presión del gas He. Sin embargo, la desestabilización y difusión del jet puede ser causada por factores adicionales como la composición del gas y la estructura de la cámara cilíndrica.

4.0.11 Dimensión del jet en función de la variación de flujo de gas

De acuerdo con la investigación realizada, la dimensión del jet en el dispositivo parece estar directamente relacionada con el flujo de gas Helio suministrado. Al aumentar el flujo de gas, la longitud del jet también aumentó de manera lineal, lo que indica una relación directa entre el flujo de gas y la dimensión del jet. Esto sugiere que un mayor suministro de gas puede conducir a una mayor longitud y grosor, lo que podría tener implicaciones importantes para la optimización y control de la formación del jet en dispositivos similares.

4.0.12 Comparativa de las figuras de Lissajous para el dispositivo con y sin electrodo externo

La medición de la potencia eléctrica durante el experimento con el jet es un aspecto importante que permite conocer la cantidad de energía que se está disipando en la descarga. El método del condensador es uno de los medios más precisos para medir la potencia del plasma.

Las figuras de Lissajous que se obtienen a partir de la medición del voltaje y la carga eléctrica permiten visualizar la relación entre estas dos variables y, por lo tanto, conocer la potencia eléctrica.

En el caso de la comparación entre la potencia eléctrica con y sin electrodo externo, se puede ver una diferencia significativa en los valores obtenidos, 10.71W y 2.76W respectivamente. Este resultado sugiere que la presencia de un electrodo externo influye en la disipación de la energía eléctrica en la descarga, y es posible que esto se deba a la influencia que tiene en la formación y estabilidad del jet.

4.0.13 Potencia eléctrica de acuerdo con el cambio en el flujo de gas

Después de repetir el experimento comparando la potencia eléctrica, se fijó el voltaje en 9157.42V y se varió el flujo de gas Helio. La medición de la potencia se realizó utilizando las figuras de Lissajous obtenidas de la conexión de entrada y salida de Voltaje al osciloscopio.

Los resultados muestran que la potencia eléctrica casi no varió con la variación del flujo de gas Helio, ya que las figuras de Lissajous permanecieron similares sin un cambio aparente. Por lo tanto, se puede concluir que el flujo de gas no tuvo un impacto significativo en la potencia eléctrica en este experimento.

4.0.14 Potencia eléctrica de acuerdo con el cambio en el voltaje

Las figuras de Lissajous son una herramienta útil para medir la potencia disipada en descargas de barrera dieléctrica y jets a presión atmosférica. La construcción de las figuras de Lissajous implica la vibración de dos osciladores armónicos en direcciones perpendiculares. En el experimento, se midió la potencia eléctrica con un osciloscopio, midiendo el voltaje y la carga eléctrica. Se llevaron a cabo 5 pruebas con diferentes voltajes y se calcularon las áreas bajo la curva de las figuras de Lissajous. Los resultados mostraron que la potencia disipada aumentó con el aumento del voltaje, siendo la prueba con el mayor voltaje de 16016.10V la que disipó la mayor potencia de 69.98 Watts. En general, estos resultados sugieren que la potencia eléctrica disipada en el jet está directamente relacionada con el voltaje aplicado.

4.0.15 Conclusiones generales

En el experimento que se realizó, se evaluaron diferentes aspectos del funcionamiento de un dispositivo que genera un jet de plasma. Se midió el tamaño del jet y se calcularon los puntos de resonancia, junto con los espectros ópticos de emisión.

Además, se comparó la potencia eléctrica con y sin la presencia de un electrodo externo. Se encontró que el uso de un electrodo externo resulta en un aumento significativo en la potencia eléctrica. También, al realizar una segunda comparativa de figuras de Lissajous con un voltaje constante y variando el flujo de gas, se encontró que la potencia eléctrica apenas varió.

Estos resultados sugieren que los esfuerzos para mejorar el rendimiento del dispositivo pueden estar mejor enfocados en otros aspectos, como la optimización de los puntos de resonancia y el control del flujo de gas.

En general, los resultados del experimento brindan una visión más clara del funcionamiento del dispositivo y pueden ser utilizados como base para futuras investigaciones y mejoras.

4.1 Referencias

1. Chen Francis F. "Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion (Second edition). Plenum Press, New York (1984).
2. Andreas Schütze, James Y. Jeong, Steven E. Babayan, Jaeyoung Park, Gary S. Selwyn, and Robert F. Hicks, "The Atmospheric-Pressure Plasma Jet: A Review and Comparison to Other Plasma Sources". *IEEE Transactions on plasma science*, Vol. 26, No. 6, 1998
3. M. Teschke, J. Kedzierski, E. G. Finantu-Dinu, D. Korzec, and J. Engemann, "High-speed photographs of a dielectric barrier atmospheric pressure plasma jet," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 33, no. 2, pp. 310, Apr. 2005.
4. Laroussi, M. (2015). Low-Temperature Plasma Jet for Biomedical Applications: A Review. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 43(3), 703-712. <https://doi.org/10.1109/tps.2015.2403307>
5. Kolb, J. F., Mohamed, A.-A. H., Price, R. O., Swanson, R. J., Bowman, A., Chiavarini, R. L., Stacey, M., & Schoenbach, K. H. (2008). Cold atmospheric pressure air plasma jet for medical applications. *Applied Physics Letters*, 92(24), 241501. <https://doi.org/10.1063/1.2940325>
6. Lee, H. W., Nam, S. H., Mohamed, A. H., Kim, G. C. and Lee, J. K. (2010), "Atmospheric Pressure Plasma Jet Composed of Three Electrodes: Application to Tooth Bleaching". *Plasma Processes Polym.*, 7: 274-280. doi:10.1002/ppap.200900083
7. Asik, J., Piatkowski, P., Foucher, M., & Rado, W. (1977). "Design of a Plasma Jet Ignition System for Automotive Application". *SAE Transactions*, 86, 1516-1530. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/44648170>
8. Vallés Abarca, José Antonio. "Descargas eléctricas en gases y plasmas: aplicaciones". *Biblioteca Virtual Miguel de Cervantes*, 2000. URL: <http://www.cervantesvirtual.com/nd/ark:/59851/bmc251h4>
9. Arón Hernández Trinidad, et al. "Diseño de una fuente de iones por medio de un reactor de plasma." *Ingenierías*, julio-septiembre 2019, Vol. XXII, No. 84
10. Tomé López César. "La distribución de velocidades moleculares de Maxwell". Atículo tomado en línea en [<https://culturacientifica.com/2017/09/12/la-distribucion-velocidades-moleculares-maxwell/>]. Experiencia docet publicado el 12 de septiembre, 2017.
11. Hyperphysics. "Development of the Boltzmann Distribution". Artículo tomado en línea en [<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/kinetic/kintem.html>]. Georgia State University
12. Chen Francis F. "Lecture Notes on Principles of Plasmas Processing".
13. I. H. Hutchinson (2002), "Principles of Plasma Diagnostics" segunda edición. Cambridge University Press, Nueva York.
14. Isabel Tanarro. "Plasmas fríos moleculares en el Universo y en el laboratorio"
15. Go, David B (2018), "Ionization and Ion Transport". Morgan & Claypool Publishers.
16. A. Schutze, J. Y. Jeong, S. E. Babayan, Jaeyoung Park, G. S. Selwyn and R. F. Hicks, "The atmospheric-pressure plasma jet: a review and comparison to other plasma sources," in *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 26, no. 6, pp. 1685-1694, Dec. 1998.

17. Subedi D.P., Joshi U.M., Wong C.S. (2017), “Dielectric Barrier Discharge (DBD) Plasmas and Their Applications”. In: Rawat R. (eds) Plasma Science and Technology for Emerging Economies. Springer, Singapore
18. S. Foster, C. Mohr, W. Viol, “Investigations of an atmospheric pressure plasma jet by optical emission spectroscopy”. Surf. Coat. Technol. 200, 827 (2005).
19. Kurihara, K., Sasaki, K., Kawarada, M., & Koshino, N. (1988), “High rate synthesis of diamond by dc plasma jet chemical vapor deposition”. Applied Physics Letters, 52(6), 437–438.
20. Herrmann, H. W., Henins, I., Park, J., & Selwyn, G. S. (1999), “Decontamination of chemical and biological warfare (CBW) agents using an atmospheric pressure plasma jet (APPJ)”. Physics of Plasmas, 6(5), 2284–2289.
21. Miller, V., Lin, A., & Fridman, A. (2015). Why Target Immune Cells for Plasma Treatment of Cancer. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 36(1), 259-268. <https://doi.org/10.1007/s11090-015-9676-z>
22. Universitat de Valencia. (1991). La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Recursos renovables: agricultura. Universitat de Valencia.
23. Padilla, D. (2005). *Método multivariantes para la evaluación de espectros de emisión. Desarrollo y aplicación de algoritmos* (tesis de maestría). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
24. González G. Series de Fourier, transformadas de Fourier y aplicaciones. Divulgaciones matemáticas 1997; 5(1): 43-60.
25. Resolución de la ecuación de onda unidimensional. (s. f.). UNAM. Recuperado 21 de febrero de 2020, de http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Ap1_22796.pdf
26. Bernal, J., Gómez, P., & Bobadilla, J. (1999). Una visión práctica en el uso de la Transformada de Fourier como herramienta para el análisis espectral de la voz. Estudios de fonética experimental, 10, 75-105. <https://www.raco.cat/index.php/EFE/article/download/144489/256869>
27. “Descargas eléctricas en gases: concepto, clasificación y fenómenos asociados”. 1010. Jiménez-Aviles, Gerardo, Ricardo Valdivia-Barrientos, Arturo Colín- Cruz, Marquidia Pacheco-Pacheco, Joel Pacheco-Sotelo. Control de un sistema de descargas de barrera dieléctrica basado en el diseño gráfico de sistemas. Ingeniería Investigación y Tecnología, XVIII, (2017).
28. Peeters Floran y Butterworth Tom. “Electrical Diagnostics of Dielectric Barrier Discharges”. IntechOpen publicado en 2018 en [<http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.80433>]
29. McAllister Willy, “Divisor de Voltaje”. Khan Academy en [<https://es.khanacademy.org/science/electrical-engineering/ee-circuit-analysis-topic/ee-resistor-circuits/a/ee-voltage-divider>].
30. Manual de Operación e Instalación del Espectrómetro HR4000 CG-UV-NIR, Ocean Optics.
31. Ficha Técnica MINIPULS – UNIVERSAL para el generador de onda cuadrada de puente completo para conducción y transformadores de alta frecuencia, GBS ELEKTRONIK.

32. Manual del usuario Tektronix, Osciloscopios de fósforo digital de la serie TDS3000B.
33. La paloma. (s. f.). Manual de Tablas y Especificaciones POLYMAQ (Polietileno UHMW-PE). La Paloma Compañía de Metales S.A. de C.V. https://www.lapaloma.com.mx/lapaloma_metales/polymaq_z1.pdf
34. Physics.nist.gov. (2018). NIST: Atomic Spectra Database Lines Form. [Online] Available at: https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html [Accessed 20 Sept 2021].
35. Pearse, R. and Gaydon, A. (1976). The identification of molecular spectra. London: Chapman and Hall.
36. Griffiths, D. J. (2005). Quantum Mechanics. Pearson Education.
37. Silverstein, R. M., Webster, F. X., & Kiemle, D. J. (2014). Spectrometric Identification of Organic Compounds. John Wiley & Sons.