



Universidad Autónoma del Estado de México
UAEM



Universidad Autónoma del Estado de México
Facultad de Ciencias

**“Diagnóstico en la generación de especies reactivas mediante un plasma
Jet y la interacción con agentes biológicos.”**

Tesis que para obtener el grado de
Doctora en Ciencias (Física)

Presenta

M. en C. María José Rodríguez Albarrán

Asesores:

Dr. Pedro Guillermo Reyes Romero

Dr. Aarón Gómez Díaz

Dra. Josefina Vergara Sánchez

Índice

I. Introducción	3
II. Marco teórico	6
1. Fundamentos de la física de plasmas.....	6
2. Generación de plasma jet	10
3. Diagnóstico y caracterización del plasma.....	11
4. Aplicaciones del plasma jet.....	19
III. Metodología	21
1. Generación del plasma jet (DBD–APPJ)	21
2. Caracterización eléctrica (método de Lissajous)	22
3. Espectroscopía de emisión óptica (OES)	22
4. Documentación del jet.....	23
5. Interacción con semillas	23
6. Procesamiento y análisis de datos.....	23
IV. Resultados	24
V. Discusión.....	81
VI. Conclusiones.....	83
VII. Referencias	85
VIII. Anexos.....	89

I. Introducción

Existe la necesidad de resolver problemas que afectan los ámbitos social, económico y ambiental mediante métodos que mejoren las condiciones de desarrollo. La Física de Plasmas ha avanzado del diagnóstico hacia aplicaciones con impacto en materiales, agua y sistemas biológicos [1]. La generación y el diagnóstico de plasmas a presión atmosférica muestran aplicaciones en desinfección, degradación de contaminantes en agua e inactivación de bacterias patógenas. En el sector agrícola, la interacción de plasmas con semillas y sustratos se ha asociado a mejoras de germinación y a mayor absorción de nutrientes como nitrógeno (N) y fósforo (P). No obstante, en muchos reportes no queda clara la relación entre las condiciones de operación del plasma y la respuesta biológica, lo que dificulta establecer procedimientos reproducibles. Además, el uso excesivo de fertilizantes se relaciona con eutrofización y contaminación difusa, de modo que la mejora en la asimilación de nutrientes adquiere relevancia [2]. En este contexto, disponer de un tratamiento usando plasmas representa una alternativa para reducir insumos agrícolas convencionales.

Entre los plasmas no térmicos a presión atmosférica destacan las descargas tipo plasma jet (APPJ) y la descarga de barrera dieléctrica (DBD), que pueden aumentar la humectabilidad de la superficie de la semilla, favorecer la imbibición y respaldar la germinación en ventanas de proceso adecuadas. Estos efectos se atribuyen tanto a la modificación fisicoquímica de la superficie (incremento de grupos polares) como a la acción de especies reactivas de oxígeno y nitrógeno generadas en la descarga. En regímenes típicos de pre-siembra no se detecta daño en ADN (ausencia de CPDs) ni efectos negativos en fenología o calidad del fruto [3]. No obstante, la magnitud de estos beneficios depende de parámetros de operación como gas de trabajo, caudal, distancia muestra-boquilla y potencia efectiva, por lo que es necesario caracterizar el plasma bajo las mismas condiciones en que se aplicará sobre el material biológico.

Algunos métodos de desinfección químicos o de irradiación presentan limitaciones operativas y ambientales. En contraste, los plasmas atmosféricos permiten desinfección a temperatura ambiente sin residuos persistentes. Estas descargas pueden aplicarse de forma directa (exposición del jet sobre la muestra) o de forma indirecta mediante agua activada por plasma (PAW), donde el balance ROS/RNS, por ejemplo, H_2O_2 , OH , NO_2^- , se refleja en variables como pH, ORP y conductividad [4]. Asimismo, se ha descrito el control de biopelículas y la reducción del anclaje bacteriano sobre superficies tratadas con plasmas atmosféricos [5]. Para aplicaciones agrícolas, este enfoque es especialmente atractivo porque permite tratar semillas o sustratos sin elevar la temperatura y sin dejar subproductos tóxicos, al tiempo que puede aportar especies nitrogenadas aprovechables por la planta.

Tomando en cuenta estas aplicaciones, se han logrado degradaciones elevadas de colorantes modelo mediante oxidación avanzada inducida por jets y descargas afines: aproximadamente 85-86% de decoloración de azul de metileno con jet sumergido en O_2 por 10 min, y hasta casi el 99% para RB-198 con APPJ de Ar. Estos resultados se acompañan de la detección de OH, O, H_2O_2 y de variaciones en el carbono orgánico total (TOC), pH y conductividad [6, 7]. En los trabajos reportados, el agua resultante no mostró efectos tóxicos en germinación bajo las condiciones evaluadas [8]. Sin embargo, la mayoría de estos trabajos reporta las condiciones de operación y los efectos logrados, pero no siempre documenta con suficiente detalle los parámetros internos del plasma (potencia disipada, frecuencia, voltaje, corriente) que permitan comparar entre configuraciones.

Para que estas aplicaciones sean escalables y comparables es imprescindible contar con un diagnóstico confiable del plasma. En este marco, el diagnóstico del plasma jet se apoya en espectroscopía de emisión óptica (OES) para identificar especies reactivas y estimar temperatura electrónica (T_e), densidad electrónica (n_e) y temperatura de gas (T_g) [9]. En jet atmosférico se emplean enfoques Boltzmann/Saha-Boltzmann y el análisis de perfiles de línea Stark y Doppler [10].

La calidad de estas estimaciones depende de la selección de líneas y de la configuración experimental [11]. Estos diagnósticos se interpretan con apoyo de coeficientes A/B, formación y ensanchamiento de líneas de emisión [12]. Asimismo, se consideran colisiones electrón - átomo/molécula y sus tasas [13]. Y se recurre a modelos colisional - radiativos en condiciones típicamente no LTE para jets atmosféricos [14]. La obtención sistemática de estos parámetros bajo las mismas condiciones de operación que las usadas en el tratamiento de semillas permite vincular directamente el régimen de descarga con el efecto biológico.

Por lo anterior, esta tesis aborda la caracterización experimental de un plasma jet atmosférico y su aplicación en semillas de hortalizas en función de los parámetros físicos caracterizados, con objetivos específicos de medición de T_e , n_e y validación de técnicas diagnósticas mediante OES [9].

HIPÓTESIS

Si un plasma jet atmosférico se genera bajo condiciones controladas de potencia, gas de trabajo y geometría, entonces producirá un conjunto reproducible de especies reactivas (ROS/RNS) identificables por espectroscopía de emisión óptica, y dicho conjunto será suficiente para inducir efectos benéficos medibles en semillas de hortalizas (mayor germinación o vigor) respecto al control.

OBJETIVO GENERAL

Caracterizar un plasma jet atmosférico mediante el diagnóstico eléctrico y óptico con espectroscopia de emisión óptica para establecer la relación entre las especies reactivas generadas con la potencia y la respuesta de semillas tratadas con un plasma jet.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Determinación de la potencia eléctrica disipada mediante diagramas de carga-voltaje
- Obtención de OES para la determinación de los ensanchamientos Gaussiano y Lorentziano.
- Caracterización de las líneas espectrales, atómicas y moleculares, obtenidas mediante OES.
- Diagnóstico de las especies reactivas generadas con el plasma Jet.
- Análisis de la interacción de un plasma Jet en el mejoramiento de crecimiento en semillas.

II. Marco teórico

El plasma se considera el cuarto estado de la materia porque es un gas parcial o totalmente ionizado que contiene electrones libres, iones positivos y partículas neutras, y cuyo comportamiento está dominado por efectos colectivos (formación de doble capas, oscilaciones de carga, ondas y estructuras autoorganizadas) [15, 16]. A diferencia de un gas neutro, en un plasma suele cumplirse la cuasi-neutralidad (densidad de iones \simeq densidad de electrones) y el apantallamiento de campos eléctricos externos ocurre en una escala de longitud finita denominada longitud de Debye [17, 18]. Según su grado de equilibrio termodinámico los plasmas se agrupan en térmicos (todas las especies comparten casi la misma temperatura) y no térmicos o de baja temperatura, donde los electrones son mucho más energéticos que iones y neutros [19, 20].

1. Fundamentos de la física de plasmas

En el universo existen diferentes estados de la materia, sólido, líquido, gas, entre los más conocidos, continuando con el cuarto estado que es el plasma, el cual compone un gas ionizado con electrones libres, iones positivos y neutros, y muestra comportamiento colectivo y cuasi neutralidad [18]. La presencia del plasma se debe cuando un gas se calienta a una temperatura lo suficientemente alta como para desprender electrones de los átomos, formándose una mezcla de iones y electrones; el término “plasma” fue introducido por Langmuir y Tonks en el contexto de gases parcialmente ionizados [19].

Existen diferentes formas de generar un plasma; en este trabajo se enfatiza la generación por descargas eléctricas (DC, pulsadas, RF, microondas) en configuraciones como corona, descarga de barrera dieléctrica (DBD) y jets a presión atmosférica. Para poder explicar las propiedades y comportamiento del plasma, es necesario considerar su apantallamiento electrostático. Si se introduce una carga positiva Q en un plasma cuasi neutro, se forma una nube de Debye que apantalla su campo; el tamaño de esa nube depende de densidad y temperatura, y conduce a la longitud de Debye [19]. Para determinar el radio de la nube se establece la relación entre el potencial electrostático ϕ y la densidad de carga ρ , mediante la ecuación de Poisson:

$$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (\text{ec. 1})$$

En donde:

ϕ es el potencial electrostático

ρ es la densidad de carga neta en el plasma

ϵ_0 es la permitividad del vacío

En el plasma neutro, las cargas se distribuyen de acuerdo con la distribución de Boltzmann, siguiendo esto, se define ρ en función de ϕ . Se tiene que la función de distribución de Boltzmann se define como:

$$n(\epsilon) = n_0 e^{-\epsilon/k_B T} \quad (\text{ec. 2})$$

En donde:

n_0 es la densidad de partículas sin perturbación

ϵ es la energía electrostática de la partícula en el plasma

k_B es la constante de Boltzmann

T es la temperatura del plasma

Ahora definiendo la energía electrostática de una partícula de carga q en un potencial ϕ , se tiene:

$$\epsilon = q\phi \quad (\text{ec. 3})$$

Sustituyendo ec. 3 en ec. 2 y considerando la densidad para electrones y iones, se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$n_e = n_0 e^{e\phi/k_B T_e} \quad (\text{ec. 4})$$

Y

$$n_i = n_0 e^{-e\phi/k_B T_i} \quad (\text{ec. 5})$$

En donde:

n_e es la densidad de los electrones

n_i es la densidad de los iones

T_e es la temperatura de los electrones

T_i es la temperatura de los iones

Ahora, se define la densidad de carga neta como:

$$\rho = e(n_i - n_e) \quad (\text{ec. 6})$$

Sustituyendo las ecuaciones 4 y 5 en 6, se obtiene:

$$\rho = en_0 \left(e^{-\frac{e\phi}{k_B T_i}} - e^{\frac{e\phi}{k_B T_e}} \right) \quad (\text{ec. 7})$$

Si el potencial es pequeño en comparación con la energía térmica de los electrones y los iones, es decir:

$$e\phi \ll k_B T_e, \quad e\phi \ll k_B T_i$$

Aplicando las series de Taylor $e^x \approx 1 + x$ para $x \ll 1$, se tiene:

$$e^{e\phi/k_B T_e} \approx 1 + \frac{e\phi}{k_B T_e}; \quad e^{-\frac{e\phi}{k_B T_i}} \approx 1 - \frac{e\phi}{k_B T_i} \quad (\text{ec. 8})$$

Sustituyendo en la ecuación 7:

$$\rho = en_0 \left(1 + \frac{e\phi}{k_B T_e} - 1 - \frac{e\phi}{k_B T_i} \right) \quad (\text{ec. 9})$$

Factorizando

$$\rho = \frac{e^2 n_0 \phi}{k_B} \left(\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_i} \right) \quad \text{o bien} \quad \rho = -\frac{e^2 n_0 \phi}{k_B T_e} \left(1 + \frac{T_e}{T_i} \right) \quad (\text{ec. 10})$$

Ahora sustituyendo la densidad (ec. 10) en la ecuación de Poisson (ec. 1):

$$\nabla^2 \phi = -\frac{e^2 n_0}{k_B \epsilon_0} \left(1 + \frac{T_e}{T_i} \right) \phi \quad (\text{ec. 11})$$

Resolviendo la ecuación diferencial de Helmholtz anterior (ec. 11), con la solución que tiene la siguiente forma:

$$\nabla^2 \phi = \frac{\phi}{\lambda_D^2} \quad (\text{ec. 12})$$

Y comparando con la ecuación 11 se obtiene (ec 13):

$$\frac{\phi}{\lambda_D^2} = -\frac{e^2 n_0}{k_B \epsilon_0} \left(1 + \frac{T_e}{T_i} \right) \phi \quad (\text{ec. 13})$$

Simplificado,

$$\frac{1}{\lambda_D^2} = -\frac{e^2 n_0}{k_B \epsilon_0} \left(1 + \frac{T_e}{T_i} \right) \quad (\text{ec. 14})$$

Despejando λ_D

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B}{n_0 e^2} \left(\frac{T_e T_i}{T_e + T_i} \right)} \quad (\text{ec. 15})$$

En el caso (más común) en el que $T_i \ll T_e$, la ecuación se reduce a (ec 16):

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T_e}{n_0 e^2}} \quad (\text{ec. 16})$$

Estas relaciones se obtienen linealizando Boltzmann – Poisson, es decir, se asume que la perturbación es débil ($e|\phi| \ll k_B T_e$), de modo que la densidad electrónica responde proporcionalmente al potencial electrostático y se descartan términos de orden superior. Esto conduce a un potencial tipo Yukawa que decae exponencialmente a la escala λ_D [19]. La cuasi neutralidad y el apantallamiento implican que, a distancias mayores que λ_D , el campo de una perturbación está fuertemente reducido; en plasmas de dos temperaturas, el apantallamiento suele estar dominado por los electrones [20]. La importancia de entender que significa la longitud de Debye radica en poder describir el plasma, tomando en cuenta que esta característica depende de las cantidades estadísticas como la densidad y temperatura de las partículas.

El primer criterio para clasificar los plasmas consiste en distinguirlos como térmicos o no térmicos, según se encuentren o no en equilibrio termodinámico. En los plasmas térmicos, todas las especies (electrones, iones, moléculas y átomos neutros) comparten una temperatura similar, lo que indica un equilibrio termodinámico. Por el contrario, los plasmas no térmicos presentan un desacoplamiento térmico entre sus componentes, siendo los electrones los que alcanzan temperaturas significativamente mayores. En función de sus temperaturas los plasmas térmicos se comportan como $T_e \approx T_i \approx T_n$ en contraste con los no térmicos donde $T_e \gg T_i \approx T_n$. En estos últimos, típicamente T_e se sitúa en el intervalo de 1 a 10 eV, mientras que T_i y T_n permanecen cercanos a temperatura ambiente [21].

Debido a la diferencia de masas, los electrones poseen mayor movilidad e interactúan de forma acelerada ante la influencia de campos eléctricos. En plasmas no térmicos, esa energía electrónica impulsa la química de activación sin elevar significativamente la temperatura del gas [21].

También se pueden definir los plasmas no térmicos como aquellos en los que no hay equilibrio termodinámico completo, cada especie puede caracterizarse por su propia temperatura (aun si la EEDF no es estrictamente Maxwelliana), con T_e muy superior a T_i y T_n ; en donde T_g es la temperatura del gas.

$$T_e \sim 10^4 K \gg T_g \sim T_i \sim 10^2 - 10^3 K$$

En donde $1 \text{ eV} = 11604.52 \text{ K}$

La gran mayoría de las descargas eléctricas correspondientes a plasmas no térmicos a baja temperatura son utilizados en aplicaciones industriales y de laboratorio, algunas de estas descargas son: tipo corona, descargas de barrera dieléctrica (DBD), descargas de radiofrecuencia (RF) entre otras.

2. Generación de plasma jet

Los plasmas atmosféricos son relevantes porque pueden operar a presión ambiente, con baja temperatura de gas y usando fuentes eléctricas relativamente compactas, lo que facilita su aplicación en superficies, líquidos y sistemas biológicos [19], [22]. En general, se obtienen aplicando un voltaje a un gas (He, Ar, aire u O_2 /mezclas) en un régimen donde los electrones ganan suficiente energía para ionizar y excitar, pero el gas no se calienta de forma apreciable, es decir, en régimen no térmico.

En las descargas de barrera dieléctrica (DBD), que son una de las arquitecturas usadas para alimentar un jet, se colocan una o dos capas dieléctricas entre los electrodos para impedir el paso a arco y forzar que la descarga se fragmente en microdescargas de muy corta duración. Esto permite sostener un plasma no térmico incluso con tensiones del orden de los kilovoltios, a frecuencias de decenas a cientos de kHz [23], [24]. Debido a la barrera dieléctrica, el transporte de carga está dominado por corriente de desplazamiento, de modo que se recurre a excitación AC o pulsada para mantener la estabilidad [25]. La energía disipada y el umbral de ruptura pueden estimarse a partir de las figuras de Lissajous (Q–V), que permiten separar el tramo puramente capacitivo del tramo donde aparecen las microdescargas [25].

Un plasma jet a presión atmosférica (APPJ) puede verse, de manera simple, como una descarga eléctrica que se forma dentro de un canal por donde fluye un gas comúnmente noble y que expulsa el plasma y las especies reactivas hacia el exterior. Suele implementarse como una DBD coaxial o planar, o bien con acoplamiento por RF, y se opera con He o Ar como gases de arrastre porque favorecen la ignición y estabilizan el chorro. La frecuencia de excitación, la forma de onda, la geometría de los electrodos y la distancia de interacción controlan la longitud del jet, la temperatura del gas y la composición de especies (bandas OH(A–X), $N_2(C–B)$, emisión de N_2^+) que pueden observarse por espectroscopia óptica de emisión [22], [26]. El uso de He facilita la ionización de Penning vía estados metaestables (He^*) y, como el chorro se mezcla con el aire circundante, aparecen especies derivadas de N_2 y H_2O ambientales. En Ar, la transferencia de energía es eficiente debido a que tiene energías de excitación y ionización bajas pero debido a que existen más colisiones entre electrón-átomo el gas suele alcanzar temperaturas mayores, por lo que su elección depende del compromiso entre estabilidad y T_g [26].

La humedad, la proximidad a la superficie o al líquido tratado y el caudal de gas modifican de forma notable la formación de radicales $\bullet OH$ y de especies de oxígeno y nitrógeno de vida corta; OES espacialmente resuelta muestra máximos locales de OH y N_2^+ a lo largo del jet cuando aumenta la fracción de vapor de agua o cuando el chorro impacta sobre un líquido [27]. A su vez, la potencia aplicada incrementa la intensidad de las líneas y, hasta cierto punto, la temperatura electrónica; en cambio, elevar demasiado el flujo puede diluir

el plasma y enfriar los electrones, reduciendo la eficiencia de generación de (Especies reactivas de oxígeno) y especies reactivas de nitrógeno ROS/RNS [9], [26].

Finalmente, cuando se trabaja con mezclas de Penning (He/O₂, He/N₂, Ar/O₂) o con gases electronegativos, la presencia de metaestables y los procesos de captura electrónica modifican el umbral de ruptura y la eficiencia global. La operación óptima se alcanza ajustando el campo reducido E/p , la fracción de gas activo y la distancia de descarga, de modo que se eviten modos de arco y se produzca el máximo de especies útiles para la aplicación objetivo [19], [22].

3. Diagnóstico y caracterización del plasma

La caracterización se realiza mediante técnicas como: espectroscopía de emisión óptica (OES), curvas voltaje y corriente correspondientes a figuras de Lissajous y ajustes de perfil de líneas espectrales para estimar densidad electrónica [28].

- **OES**

La espectroscopía óptica de emisión (OES) permite analizar la radiación emitida por átomos y moléculas cuando pasan de un estado excitado a uno de menor energía. Las longitudes de onda son características y permiten identificar especies y estimar parámetros como temperatura y densidad electrónica [21]. El análisis se centra en el visible (380 - 780 nm) y UV cercano (190 - 379, 200 - 380 nm), donde transiciones típicas en APPJ por ejemplo OH a 309 nm emite con intensidad suficiente para diagnóstico [29].

En el diagnóstico por OES, la forma y el ancho de línea espectral codifican propiedades del plasma; deben considerarse las contribuciones natural e instrumental en el estudio del perfil de línea espectral (gaussianos), Doppler (gaussiano) y de presión (lorentzianos: Stark, resonancia y Van der Waals), por lo que el perfil experimental se ajusta con el perfil de Voigt que es la convolución gaussiana y lorentziana [30].

El perfil total se ajusta separando contribuciones mediante el perfil de Voigt, donde el FWHM experimental se aproxima por la ecuación 17:

$$\Delta\lambda^{exp} = 0.5\Delta\lambda_{1/2}^L + \sqrt{(0.5\Delta\lambda_{1/2}^L)^2 + (\Delta\lambda_{1/2}^G)^2} \quad (\text{ec. 17})$$

Ensanchamiento Doppler

Es el ensanchamiento de las líneas espectrales resultante del movimiento térmico de los átomos, iones y moléculas en el plasma. Considerando que las partículas tienen una distribución de velocidades que obedecen la ley de distribución de Maxwell, se tendría un perfil Gaussiano [30]. El FWHM (ec 18) del perfil depende de la frecuencia de la línea espectral, la masa de la partícula que emite y de la temperatura del emisor:

$$\Delta\lambda_D = \lambda_0 \left(8 \ln 2 \frac{k_B T_g}{m_a c^2} \right)^{0.5} \quad (\text{ec. 18})$$

En donde:

$\Delta\lambda_D$ es el ensanchamiento Doppler

λ_0 es la longitud de onda

k_B es la constante de Boltzmann

T_g es la temperatura del gas

m_a es la masa del emisor

c es la velocidad de la luz

Ensanchamiento natural

Este tipo de ensanchamiento se origina a partir de considerar el tiempo finito de los niveles excitados de un átomo, la magnitud es del orden de 10^{-4} ns, por lo que puede considerarse despreciable en el análisis de plasmas APPJ [30].

Ensanchamiento Instrumental

Como es en la mayoría de los sistemas de medición, se presenta un ensanchamiento debido al instrumento, esta resolución depende de cada detector o sistema de dispersión y se produce un perfil gaussiano. Este se podría determinar utilizando una lámpara monocromática o bien, el aparato de medición ya lo considera en las especificaciones técnicas.

Ensanchamiento Stark

Partiendo de lo general, se tiene el ensanchamiento por presión en el que los átomos o moléculas chocan entre sí, existe una perturbación en los niveles de energía de los átomos o moléculas, cambiando las frecuencias de las líneas de emisión o absorción. Ahora un caso particular de este tipo de ensanchamiento es el Stark, en el cual los átomos se ven afectados por el campo eléctrico debido al movimiento relativo entre los átomos y las partículas cargadas que los rodean. Este campo eléctrico modifica parcialmente la degeneración de los niveles atómicos (efecto Stark) y esto cambia la forma, el ancho y la posición de la línea espectral. [30].

El ensanchamiento se relaciona directamente con la densidad electrónica, es común que se utilicen la serie de Balmer para realizar la estimación de la densidad, pero al tratarse de un APPJ, el contenido de hidrógeno es muy bajo, es por ello por lo que se utiliza el ensanchamiento Stark para líneas no hidrogenadas (H_α , H_β y H_γ) [31].

En este sentido, la ecuación de Griem para el ensanchamiento Stark es (ec 19):

$$\Delta\lambda_{stark} = \omega(1 + 1.75A(1 - 0.75R)). \quad (\text{ec. 19})$$

En donde:

ω es la contribución al ensanchamiento por el impacto de los electrones.

A es el parámetro de ensanchamiento.

R es la longitud de Debye.

Teniendo más detalle con lo anterior, ω se expresa mediante la ecuación 20 como:

$$\omega = N_e \int_0^\infty v f_e(v, T_e) \sigma_\omega(v) dv \quad (\text{ec. 20})$$

En donde:

N_e es la densidad electrónica,

f_e es la distribución de velocidades de los electrones (Maxwelliana a T_e)

σ_ω es la sección eficaz del ensanchamiento.

A es un parámetro que cuantifica la aportación iónica al ensanchamiento Stark (microcampos cuasiestáticos + efectos de dinámica iónica) por encima de la anchura por impacto electrónico ω . Los microcampos cuasiestáticos son campos eléctricos locales debido a las cargas de los iones, como el comportamiento de estos microcampos es casi constante produce corrimiento Stark; los efectos de dinámica iónica son un conjunto de variaciones temporales del campo iónico local, se presentan cuando el tiempo característico de cambio del microcampo iónico (τ_i) es comparable con el tiempo de emisión de la transición (τ_{em}), de modo que el campo no permanece constante durante la emisión y altera el perfil Stark respecto al caso cuasiestático. El parámetro de apantallamiento R mide cuánto reduce el campo micro eléctrico iónico, es una corrección de apantallamiento de Debye.

Los cuales están definidos como:

$$A = \frac{4\pi N_e}{3} \left(\frac{1}{3(\phi_\alpha^s + \phi_\alpha^\omega)} \left(\frac{\hbar}{m} \right)^2 \sum_{\alpha'} \frac{|\langle \alpha | r | \alpha' \rangle|}{\omega_{\alpha\alpha'}} \right)^{3/4} \quad (\text{ec. 21})$$

$$R = (36\pi N_e)^{1/6} \sqrt{\frac{e^2}{k_B T_e}} \quad (\text{ec. 22})$$

En donde:

N_e es la densidad electrónica.

\hbar es la constante de Planck.

m es la masa del electrón.

α es el nivel superior de transición.

α' es el subnivel correspondiente.

$\omega_{\alpha\alpha'}$ es la frecuencia de transición entre los niveles $\alpha\alpha'$.

e es la carga del electrón.

k_B es la constante de Boltzmann.

r es el operador de posición del electrón ligado en el átomo emisor.

T_e es la temperatura electrónica.

Ensanchamiento van der Waals

El ensanchamiento por van der Waals (VdW) (ec 23) surge de la interacción dipolo - dipolo inducido entre un emisor excitado y un átomo o molécula neutra en su estado fundamental, con densidad N_g . Según [30], el aporte VdW al perfil de la línea es Lorentziano y su FWHM crece con la densidad de las partículas neutras, con la velocidad promedio térmica \bar{v} y con la constante de interacción C_6 que es un parámetro físico que cuantifica la fuerza de la interacción dipolo-dipolo inducido entre el átomo que emite la línea (en un nivel electrónico específico) y el átomo neutro del gas perturbador de fondo en estado fundamental. Tiene unidades en SI de Jm^6 . De modo que el ensanchamiento está definido como:

$$\Delta\lambda_{VdW} = \frac{\lambda_{ul}^2}{2\pi c} 8.16 \left(\frac{C_6}{\hbar}\right)^{\frac{2}{6}} \bar{v}^{3/5} N_g \quad (\text{ec. 23})$$

En donde:

λ_{ul}^2 es la longitud de onda de la transición

La velocidad promedio térmica está dada por:

$$\bar{v} = \left(\frac{8k_B T_g}{\pi\mu}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{ec. 24})$$

En donde:

T_g es la temperatura macroscópica del gas

μ es la masa reducida.

En el caso de las series de Balmer H_β , si el ensanchamiento VdW excede ~ 0.05 nm, el perfil total por VdW tiene una buena aproximación por Lorentz; por debajo de ese umbral, la estructura fina altera la forma y deja de ser estrictamente Lorentziana [30].

- **Caracterización eléctrica**

Para caracterizar eléctricamente el comportamiento de una descarga de barrera dieléctrica se puede utilizar un circuito eléctrico equivalente a dos capacitores conectados en serie, uno debido a la distancia de separación entre el dieléctrico y una placa conductora, espacio llenado con un gas, y el segundo, asociado al dieléctrico y el segundo conductor o placa. La capacitancia total C viene dada como se muestra en la ecuación 25, siendo que la capacitancia total es controlada por la capacitancia de la separación [25-32].

$$C = \frac{C_d C_g}{C_d + C_g} = \frac{C_g}{1 + C_g / C_d} = \frac{C_g}{1 + d / \epsilon_r g} \quad (\text{ec. 25})$$

En donde

C_d es la capacitancia de separación de los electrodos.

C_g es la capacitancia del dieléctrico.

ϵ_r es la permitividad dieléctrica relativa.

g es la distancia gap.

d es el espesor.

Los parámetros importantes para monitorear el comportamiento son el voltaje de descarga U_D , la corriente de descarga I , la carga transferida Q , la energía eléctrica aplicada y la intensidad de campo reducida promediada E/p . Para representar el comportamiento de la carga transferida y el voltaje suministrado se utilizan las figuras de Lissajous (Figura 1), siendo posible determinar el voltaje externo mínimo a la que se produce la ruptura, la energía eléctrica consumida por ciclo de ruptura y la potencia eléctrica utilizando la ecuación anterior. El voltaje de la descarga se puede calcular mediante la secuencia de ecuaciones (26, 27, 28) que se muestra a continuación:

$$\begin{aligned}
 E_{el} &= \oint U(t)dQ = C_{meas} \oint U(t)dU_{meas} \\
 &= 4C_d \frac{1}{1+C_g/C_d} \oint U(t)dU_{meas} \equiv \text{área del diagrama } Q - V \quad (\text{ec. 26})
 \end{aligned}$$

En donde:

$U(t)$ es el voltaje aplicado entre electrodos del dispositivo (DBD/jet) en función del tiempo.

Q es la carga transferida acumulada en el sistema durante el ciclo.

$\oint U(t)dQ$ es la energía por ciclo.

C_{meas} es el capacitor monitor (de referencia).

$U_{meas}(t)$ es el voltaje medido en el capacitor monitor.

C_d es la capacitancia efectiva del del DBD.

C_g es la capacitancia efectiva del gap/plasma.

$\frac{4C_d}{1+C_g/C_d}$ es el factor geométrico equivalente que aparece al graficar el voltaje aplicado a la porción efectiva que hace trabajo en el sistema serie C_d-C_g durante el ciclo completo.

$$P_{el} = \frac{1}{T} E_{el} = f E_{el} \quad (\text{ec. 27})$$

Donde:

f es la frecuencia de la fuente de alimentación.

$$U_D = U_{min} \frac{1}{1+C_g/C_d} \quad (\text{ec. 28})$$

En donde:

U_D es el voltaje en el gas (gap)

U_{min} es el voltaje aplicado a los electrodos

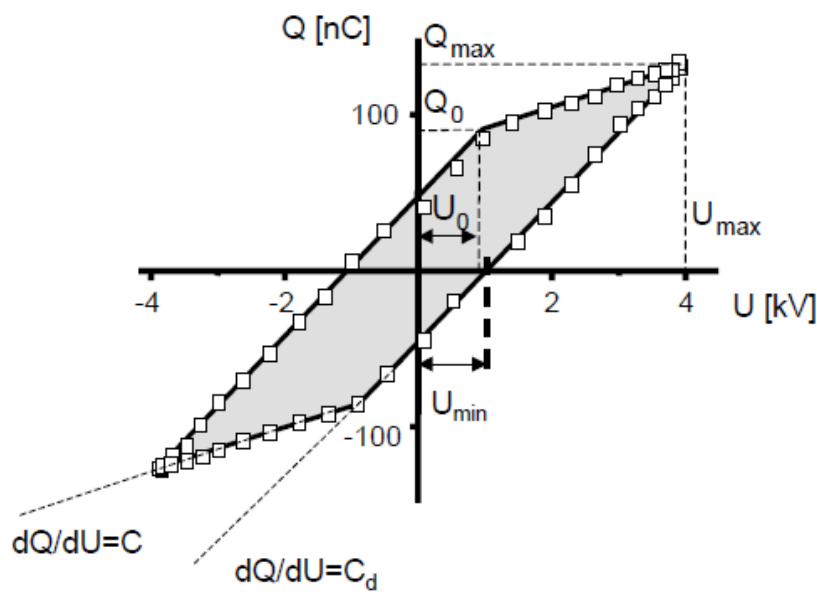


Figura 1. Figura de Lissajous [38]

La caracterización de este tipo de descarga ayuda a mostrar que la descarga opera a bajas potencias, por lo que es viable para la aplicación en agentes biológicos.

Dinámica Q–V, criterio de Manley y análisis armónico

En un DBD/APPJ con tensión alterna, el sistema se comporta en primera aproximación, como dos ramas, una capacitiva (barreras + hueco), y la otra no lineal, donde ocurren micro descargas [25].

Si durante parte del ciclo no hay descarga y solo desplazamiento, la relación $Q = C_{eq}V$ domina y el trazo Q - V es casi lineal. Cuando la tensión supera el umbral de ruptura, aparecen picos de corriente de conducción, se inyecta carga sobre las superficies dieléctricas y la curva se abre formando un paralelogramo con esquinas y curvaturas [24]. En ese lazo, el área de la forma:

$$A_{Q-V} = \oint V dQ. \tag{ec. 29}$$

es la energía por ciclo y la potencia media resulta $P = f A$ que es el criterio de Manley [32]. La pendiente de los tramos casi rectos corresponde a la capacitancia efectiva; las esquinas marcan inicio y fin de micro descargas. El bucle refleja una histéresis eléctrica de carga–descarga en el hueco (no es histéresis magnética) asociada al depósito de carga superficial y a la conmutación del plasma [25]. Estas firmas están ampliamente reportadas y se emplean para validar el montaje y medir potencia con robustez frente a corrientes de desplazamiento [29].

Si la excitación o la respuesta no es sinusoidal entonces:

$$V(t) = \sum_{n \geq 1} V_n \sin(n\omega t + \phi_n), I(t) = \sum_{n \geq 1} I_n \sin(n\omega t + \psi_n) \quad (\text{ec. 30})$$

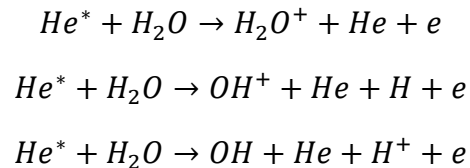
con $\omega = 2\pi f$. En régimen lineal puramente capacitivo, $I \approx C_{\text{eq}} \dot{V} \Rightarrow I_n \approx n\omega C_{\text{eq}} V_n$ con un desfase de 90° . Pero en un DBD real aparecen no linealidades (emisión, carga superficial, conducción transitoria) que generan armónicos adicionales y cambian las fases ψ_n . En el plano Q - V, esos armónicos:

- Deforman el paralelogramo (bordes curvos en lugar de segmentos perfectos),
- Introducen asimetrías entre semiciclos (carga y descarga no idénticas),
- Añaden “abultamientos” locales en torno a los puntos de ruptura (micro descargas),
- Pueden producir lazos internos o puntas si hay saturación instrumental o retardo de medida.

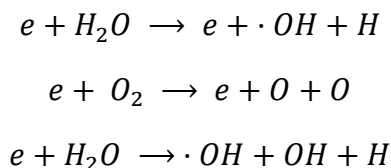
La suma de todas las contribuciones cierra un lazo por periodo T ; su área total sigue siendo la energía por ciclo. En la práctica, la forma del lazo revela la firma espectral: a mayor contenido armónico por la forma de onda aplicada o por conmutación abrupta en el plasma que se aleja del paralelogramo ideal. Esto se observa en comparativas de esquemas Q - V (carga-voltaje) frente a esquemas VI (voltaje-corriente) y en estudios donde se modifican forma de onda y topología [29].

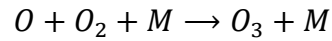
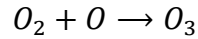
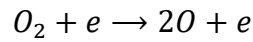
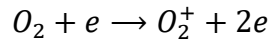
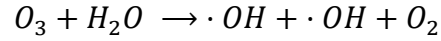
- ***Especies Reactivas***

En APPJ con He como gas de arrastre, los estados metaestables del He* (He(2³S₁) y He(2¹S₀)) activan rutas de ionización de Penning y, junto con humedad/oxígeno del ambiente, desencadenan cadenas que producen O, OH, O₃ y emisiones de N₂/N₂⁺, coherentes con los espectros OES observados [33].



Algunas otras especies reactivas se producen a partir de la interacción de los electrones del plasma con el ambiente son:





En donde M es cualquier átomo neutro [34].

4. Aplicaciones del plasma jet

El plasma jet atmosférico (APPJ) se ha utilizado en medicina para desinfección y apoyo a la cicatrización mediante la acción combinada de ROS/RNS en exposición directa o indirecta (PAW) [35]. En estos casos, la eficacia antimicrobiana y la bioseguridad se sustentan en la generación controlada de especies como H_2O_2 , $\cdot OH$ y NO_2^- , con firmas fisicoquímicas en pH, ORP y conductividad [36].

En industria, el APPJ habilita modificación superficial a temperatura ambiente, aumento de energía superficial, activación de grupos funcionales y mejora de adhesión sin baños químicos y con líneas escalables [37]. En particular, jets atmosféricos basados en DBD y RF permiten activar es decir modificar la capa más externa de polímeros y metales, así como depositar recubrimientos finos vía plasma polimerización con buen control de uniformidad [38]. Procesos como PCO (oxidación químico-plasmática) y APCVD (Deposición química en fase vapor a presión atmosférica) amplían la funcionalización de superficies en atmósfera con control de química y tasas de proceso [39]. La escalabilidad a áreas grandes se logra con plataformas roll-to-roll y arreglos multijet, manteniendo operación a temperatura ambiente.

En ciencia de materiales, configuraciones APPJ y afines se emplean para síntesis y funcionalización de nanomateriales y películas delgadas en condiciones no térmicas, aprovechando flujos de especies reactivas a presión atmosférica. El carácter localizable del APPJ permite tratamientos milimétricos y controlados sobre células vivas o micro áreas minimizando carga térmica cuando se ajustan gas, potencia y distancia de trabajo [26].

A su vez, es posible ampliar área de tratamiento mediante múltiples jets acoplados o líneas en continuo para cubrir superficies mayores manteniendo la operación a temperatura ambiente. Como alternativa a la exposición directa, la vía indirecta con PAW permite

transportar la química reactiva generada por el jet hasta el sitio de interés, con estabilidad temporal útil para aplicaciones biomédicas y de sanitización [33].

En aplicaciones donde la integridad del sustrato es crítica, el ajuste de gas portador, aditivos ($O_2/H_2O/N_2$), frecuencia y potencia del APPJ gobierna el balance de ROS/RNS y la temperatura del gas, asegurando eficacia sin daño térmico [36].

Aplicaciones de un plasma jet

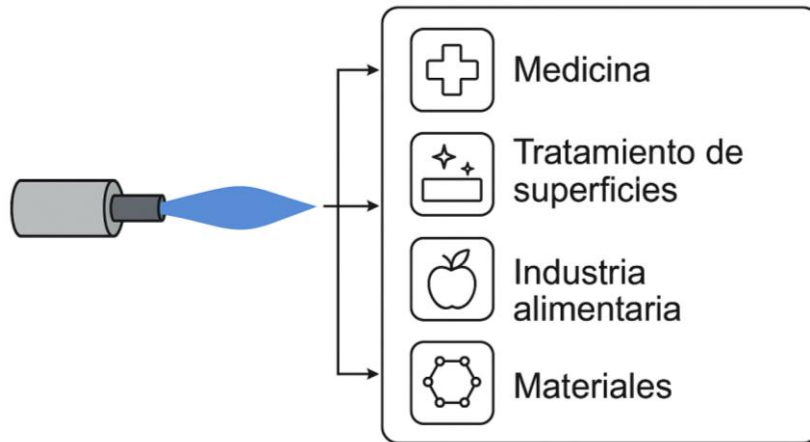


Figura 2. Representación esquemática de aplicaciones de un Plasma jet.

III. Metodología

1. Generación del plasma jet (DBD-APPJ)

El plasma jet se generó mediante Descarga de Barrera Dieléctrica (DBD) excitada por una fuente pulsada GBS elektronik gmbh, con amplitud 6–60 kVpp y frecuencia 0.5–40 kHz. El dispositivo está conformado por un tubo dieléctrico cerámico (diámetro externo 8.0 mm, interno 4.5 mm, longitud 7.2 cm), un electrodo interno de tungsteno (10 cm, alta tensión) y un electrodo externo en forma de anillo de cobre (ancho 5 mm). El gas de arrastre fue helio (He), elegido por su bajo voltaje de ruptura y alta conductividad térmica. El He se suministró desde cilindro y se reguló con flujómetro. Las conexiones se realizaron con mangueras y accesorios para gas compatibles con el caudal de operación. Antes de cada serie se verificó estabilidad de flujo y ausencia de fugas. El conjunto se montó en soporte acrílico con toma de entrada de He y conexión a alto voltaje usando un electrodo de tungsteno.

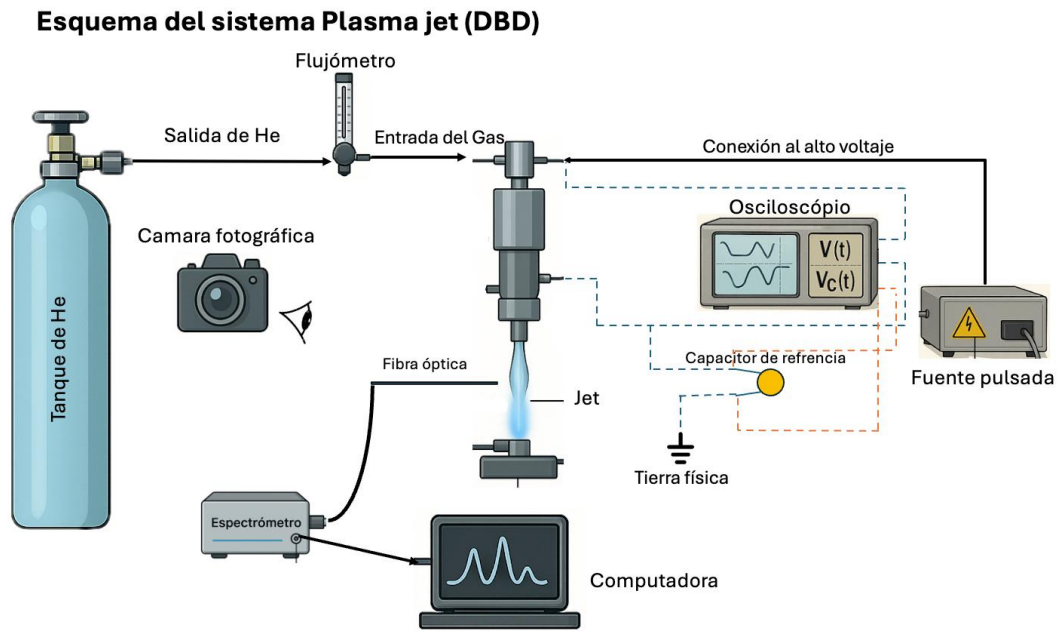


Figura 3. Sistema experimental del dispositivo Jet.

2. Caracterización eléctrica (método de Lissajous)

Se empleó el método Lissajous (Q - V) con capacitor de referencia (C_{ref}) en serie con el dispositivo para determinar la carga:

$$Q(t) = C_{ref} V_C(t). \quad (\text{ec. 31})$$

Se utilizaron diferentes capacitores {0.23, 0.46, 0.66, 1.0145} μF (grado alto voltaje). Se registraron simultáneamente el voltaje aplicado $V(t)$ y el voltaje en el monitor $V_C(t)$ con utilizando un osciloscopio Tektronix TDS2012 (1 GS/s). Se obtuvo la figura Q - V cerrado por ciclo; la energía por ciclo y la potencia media se calcularon como:

$$E_{el} = \oint V(t) dQ, P_{el} = f E_{el}. \quad (\text{ec. 32})$$

El voltaje de descarga U_D se estimó a partir de la geometría del paralelogramo. Los criterios de calidad son: los tramos lineales (componente capacitiva), las esquinas (ruptura/microdescargas), el cierre por periodo y la simetría entre semiciclos. Como nota técnica, si la capacitancia de referencia es demasiado grande puede redondear las esquinas de la figura de Lissajous y subestima la potencia calculada.

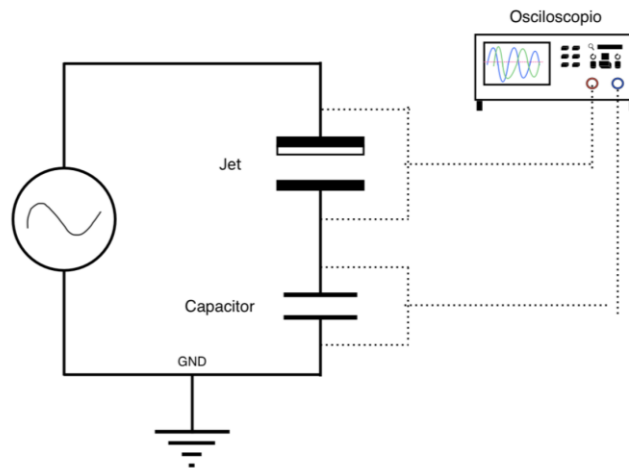


Figura 4. Circuito eléctrico para medir voltaje en el dispositivo Jet.

3. Espectroscopía de emisión óptica (OES)

La OES se realizó con espectrómetro Ocean Optics Flame acoplado a una fibra óptica, la cual se colocó a 10 cm del jet (geometría fija) para evitar saturación e interferencias.

Calibración y adquisición.

- Ancho instrumental: por especificación del instrumento correspondiente a 0.1 nm.
- Rango espectral: 200–800/1000 nm (UV cercano - visible).
- Parámetros de captura: tiempo de integración [400 ms], corrección de línea base (fondo) y normalización con respecto a la intensidad con mayor valor.

Identificación de emisiones. Se identificaron OH (A - X, ~309 nm), N₂ (C - B, 2PS), N₂⁺ (B - X, 1NS) y líneas de He relevantes.

Ajuste de líneas (Voigt) y parámetros.

El perfil total se ajustó con Voigt para separar contribuciones gaussiana (Doppler + instrumental) y lorentziana (Stark / VdW / resonancia):

$$\Delta\lambda^{exp} = 0.5 \Delta\lambda_{(1/2)}^L + \sqrt{(0.5 \Delta\lambda_{(1/2)}^L)^2 + (\Delta\lambda_{(1/2)}^G)^2}. \quad (\text{ec. 33})$$

A partir del ajuste se estimaron T_g (Doppler o rotacional de OH) y n_e (Stark en líneas no hidrogenadas).

4. Documentación del jet

Se tomaron fotografías del jet para combinaciones (voltaje, frecuencia, presión, distancia) a fin de documentar longitud, estabilidad y modo (difuso/filamentario), y correlacionarlas con potencia y señales OES.

5. Interacción con semillas

Se evaluó la interacción del plasma con semillas de cilantro y jitomate a distintos tiempos de exposición (1, 2, 3, 4, 5 minutos y 10, 20, 50 segundos). Se incluyeron grupos Control (sin tratamiento), Gas solo (flujo sin descarga) y APPJ (parámetros seleccionados), con réplicas biológicas y técnicas. El seguimiento de porcentaje y tiempo de germinación se realizó con risotrón y germinador, registrando volumen de agua ~20 ml por risotrón, frecuencia de riego (cada 48 hrs), tipo de sustrato (peatmoss, vermiculita, perlita y humus) y pH (neutro). Se verificó ausencia de daño térmico y se documentaron observaciones fenológicas iniciales [3].

6. Procesamiento y análisis de datos

Se utilizaron diferentes softwares para el análisis de datos, para la caracterización eléctrica y óptica se utilizó Matlab y Origin, así como para determinar la temperatura y densidad electrónica.

IV. Resultados

Para poder determinar la potencia del sistema se utilizó un código en Matlab que permite analizar ciclo por ciclo de los datos y determinar la energía, es decir el área de la figura de Lissajous. En la tabla 1 (voltaje $V = 6\text{kV}$) se muestra la comparación de la energía (área de la figura de Lissajous), potencia sin ajuste y con ajuste Savitzky-Golay de la figura de Lissajous esto con el propósito de disminuir la pérdida de información analizada, también se presenta la frecuencia de trabajo de cada ciclo. Observando que la potencia para cada ciclo coincide en valores. En general, en la adquisición de datos se obtiene una señal compuesta por varios ciclos, por lo que se analiza cada ciclo y se compara la potencia en cada uno.

Tabla 1. Comparación de energías y potencia para diferentes ciclos de trabajo

Área sin ajuste	Potencia sin ajuste (W)	Área con ajuste	Potencia con ajuste (W)	Frecuencia (Hz)
4.78×10^{-04}	6.83	4.88×10^{-04}	6.96	14285.71
4.82×10^{-04}	6.88	4.87×10^{-04}	6.95	14285.71
4.83×10^{-04}	6.89	4.88×10^{-04}	6.97	14285.71
4.84×10^{-04}	6.91	4.88×10^{-04}	6.96	14285.71
4.86×10^{-04}	6.94	4.86×10^{-04}	6.94	14285.71
4.75×10^{-04}	6.77	4.84×10^{-04}	6.91	14285.71
4.73×10^{-04}	6.75	4.84×10^{-04}	6.91	14285.71
4.82×10^{-04}	6.87	4.84×10^{-04}	6.91	14285.71
4.81×10^{-04}	6.85	4.86×10^{-04}	6.94	14285.71

También se muestra las gráficas para cada uno de los ciclos, voltaje suministrado (fig 5, 6) y la carga calculada mediante el voltaje medido en el capacitor (fig 5, 6), así como la frecuencia fundamental (fig 11). El código arroja la figura de Lissajous con y sin ajuste (fig 7, 8, 9) para cada ciclo, siendo que en ocasiones el ruido electrónico puede no considerar toda el área. Los datos mostrados en la tabla 1 y en las figuras 5, 6, 7, 8, 9, 10 y 11 corresponden a un voltaje de 6 kV, utilizando un capacitor de $0.46 \mu\text{F}$.

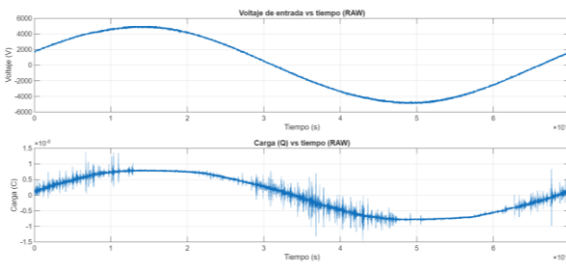


Figura 5. Voltaje de entrada y carga calculada sin ajuste

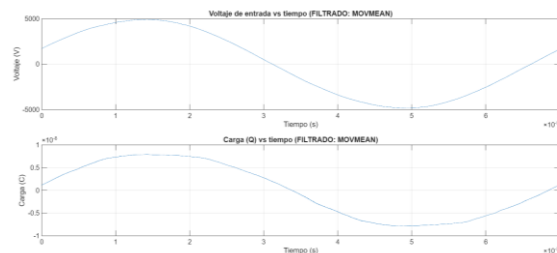


Figura 6. Voltaje de entrada y carga calculada con ajuste

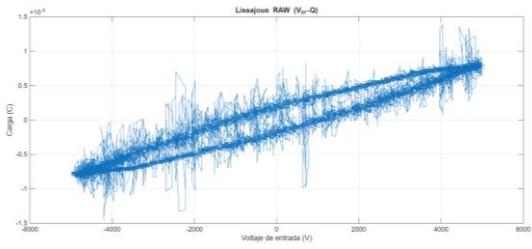


Figura 7. Figura de Lissajous sin ajuste

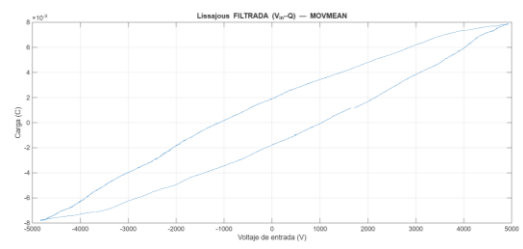


Figura 7. Figura de Lissajous con ajuste

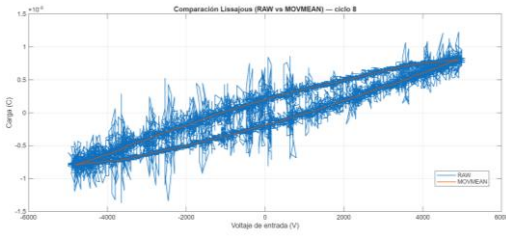


Figura 8. Comparación de la figura de Lissajous con ajuste

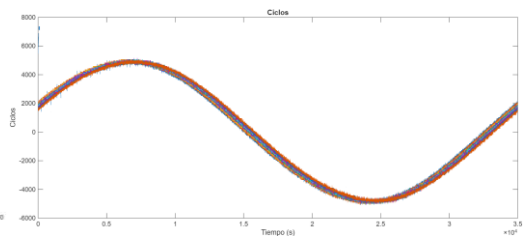


Figura 9. Ciclos de trabajo

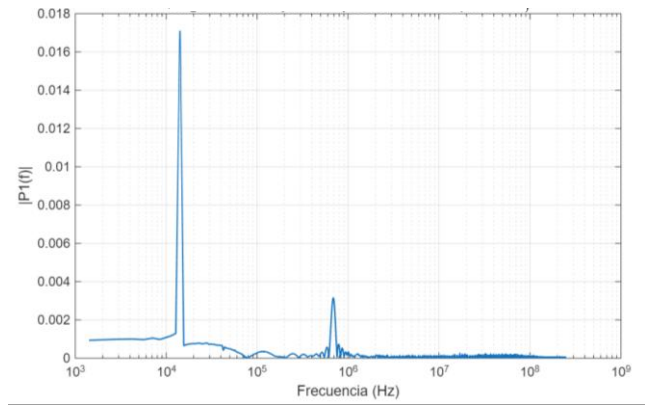


Figura 10. Frecuencia fundamental

En la tabla 2 se muestra la comparación de potencia con ajuste y sin ajuste con los tres voltajes (6, 12 y 18 kV), así como la frecuencia fundamental para cada uno, se realizó el mismo análisis con los tres voltajes correspondientes.

Tabla 2. Comparación de potencias

Voltaje	Potencia sin ajuste (W)	Potencia con ajuste (W)	Frecuencia (Hz)
1	6.86	6.94	14285.71
2	14.13	14.24	13571.42
3	25.49	25.67	12857.14

Posteriormente se realizó la comparación de las diferentes formas de obtener datos del osciloscopio: normal, pico a pico y promedio, para un capacitor de $0.46 \mu\text{F}$ y tres voltajes diferentes: voltaje 1 correspondiente a 6kV , voltaje 2 a 12 kV y voltaje 3 a 18kV . Lo que se muestra en la tabla 3 es la potencia para los tres voltajes y la frecuencia.

Tabla 3. Comparación diferentes métodos de adquisición de datos

Potencia (W)

Voltaje	Pico-pico	Normal	Promedio
1	2.68	2.32	1.37
2	8.24	6.05	4.41
3	17.92	18.29	6.29

Frecuencia (Hz)

Voltaje	Pico-pico	Normal	Promedio
1	14285.71	14285.71	14285.71
2	12857.14	12857.14	14285.71
3	12857.14	12857.14	12857.14

Se muestran las gráficas para los diferentes métodos de obtención de datos mostrando el análisis para el voltaje 3 y considerando solo 1 ciclo de trabajo.

Adquisición “normal”

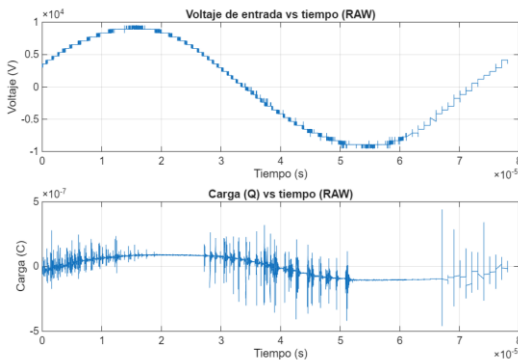


Figura 12. Voltaje de entrada y carga calculada sin ajuste

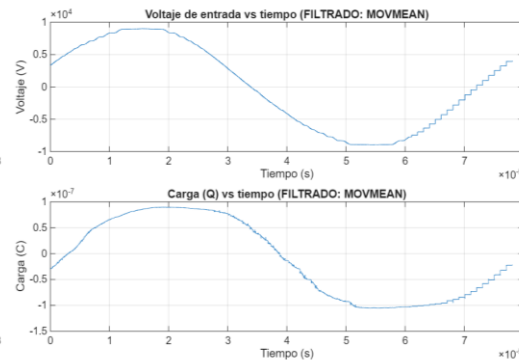


Figura 13. Voltaje de entrada y carga calculada con ajuste

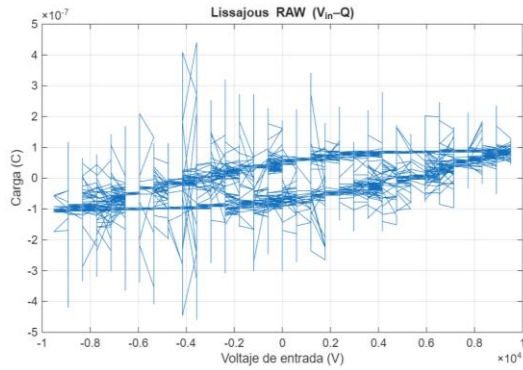


Figura 14. Figura de Lissajous sin ajuste

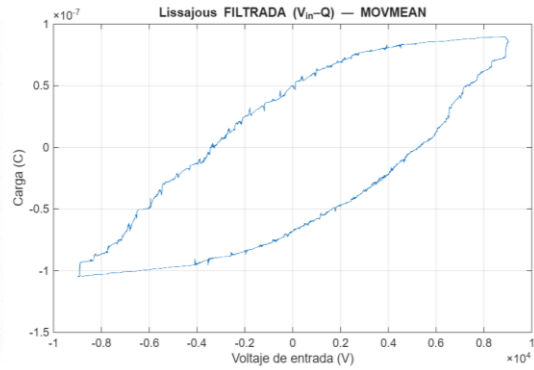


Figura 15. Figura de Lissajous con ajuste

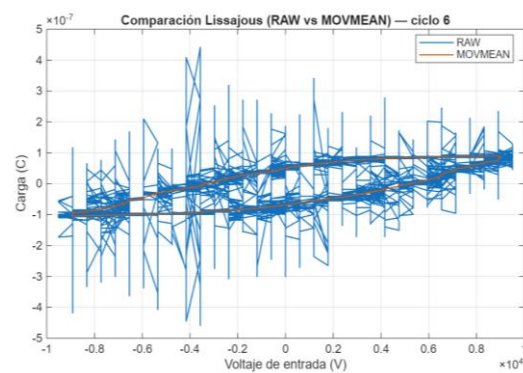


Figura 16. Comparación de la figura de Lissajous con ajuste

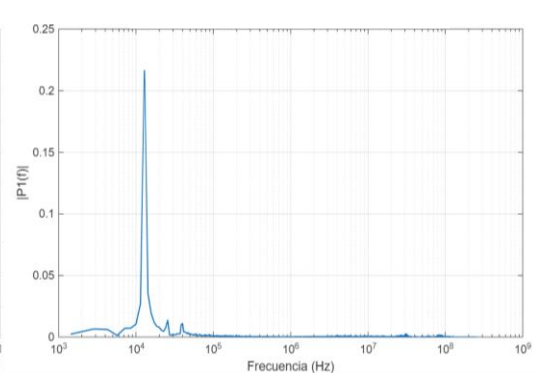


Figura 117. Frecuencia fundamental

Adquisición "pico-pico"

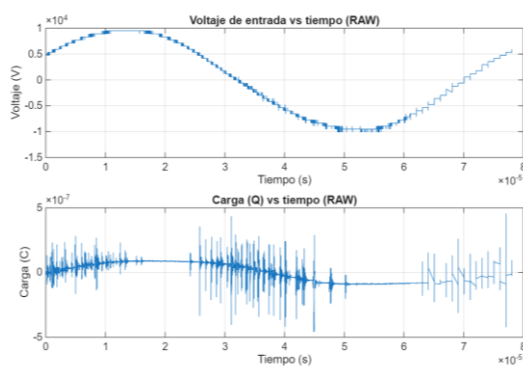


Figura 18. Voltaje de entrada y carga calculada sin ajuste

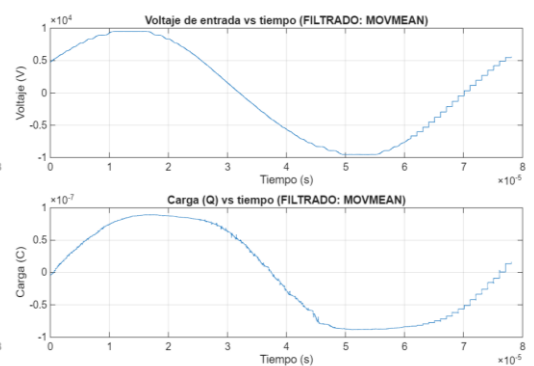


Figura 19. Voltaje de entrada y carga calculada con ajuste

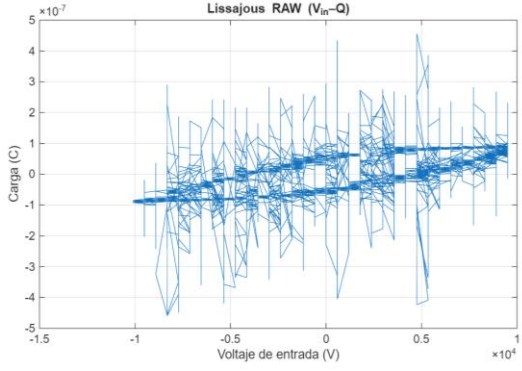


Figura 20. Figura de Lissajous sin ajuste

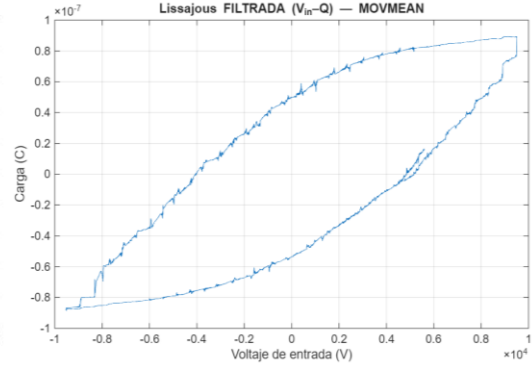


Figura 21. Figura de Lissajous con ajuste

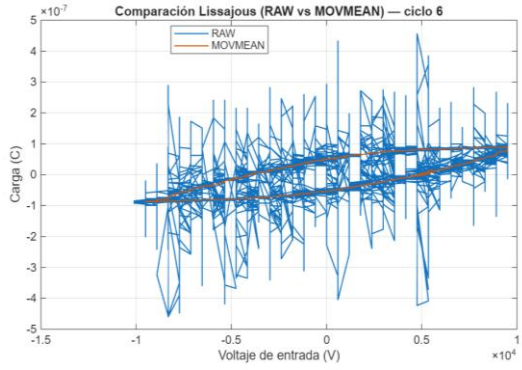


Figura 22. Comparación de la figura de Lissajous con ajuste

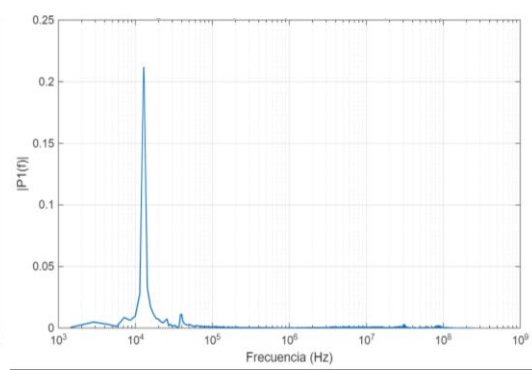


Figura 23. Frecuencia fundamental

Adquisición "promedio"

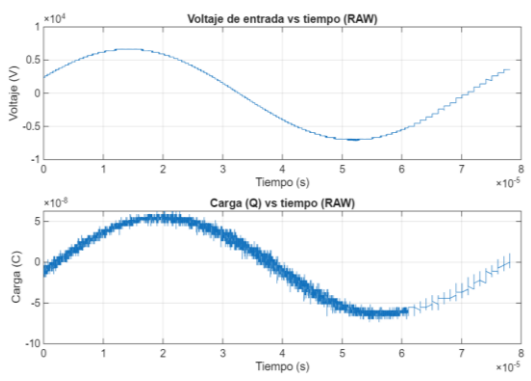


Figura 24. Voltaje de entrada y carga calculada sin ajuste

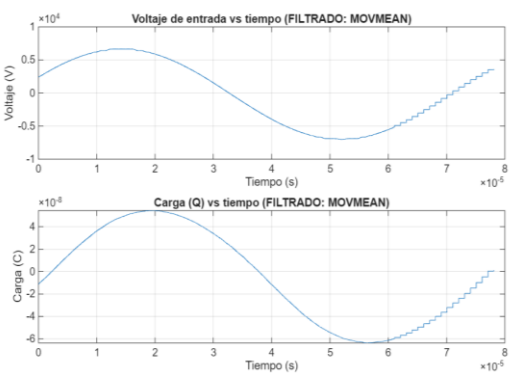


Figura 25. Voltaje de entrada y carga calculada con ajuste

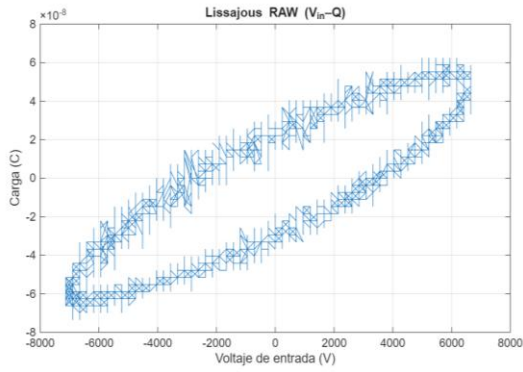


Figura 26. Figura de Lissajous sin ajuste

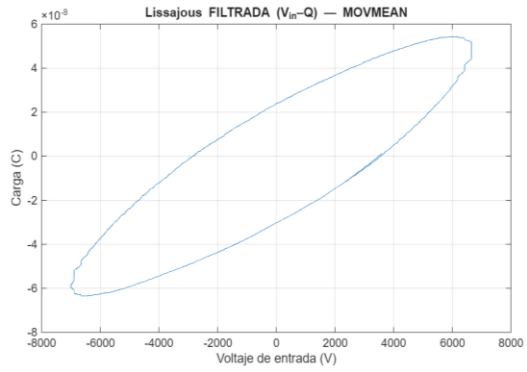


Figura 27. Figura de Lissajous con ajuste

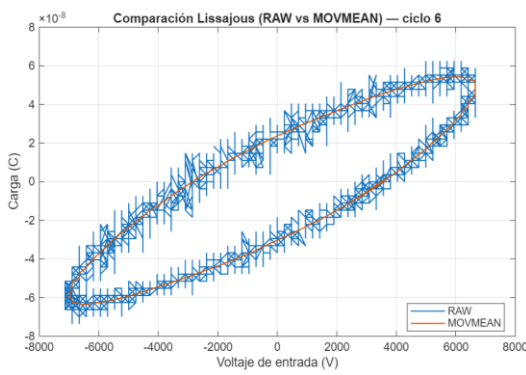


Figura 28. Comparación de la figura de Lissajous con ajuste

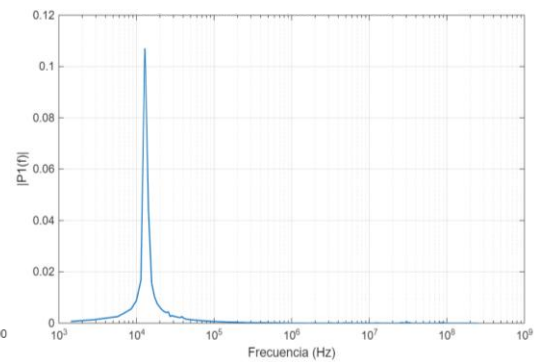


Figura 29. Frecuencia fundamental

Una vez calibrado el sistema de medición de voltaje, se caracterizó el plasma jet utilizando helio como gas de arrastre. Se aplicaron tres voltajes (6, 12 y 18 kV) y tres presiones (30, 60 y 90 PSI). Para cada configuración se registraron los voltajes con cuatro capacitores y, en paralelo, se obtuvieron espectros de emisión óptica y fotografías del jet. El objetivo fue identificar la combinación más adecuada para la interacción con semillas de hortaliza, priorizando potencia y estabilidad del jet como criterios de operación segura.

Se muestran las tablas con la comparación de potencias para cada capacitor y presión de He. En la identificación de capacitores cada etiqueta corresponde a: Capacitor 1: 0.23 μ F, capacitor 2: 0.46 μ F, capacitor 3: 0.66 μ F, capacitor 4: 1.0145 μ F.

Tabla 4. Presión de 30PSI

Potencia (W)					Frecuencia (Hz)			
Voltaje/capacitor	1	2	3	4	1	2	3	4
1	0.17	0.11	0.09	0.06	14285.76	14285.71	14285.71	14285.71
2	0.65	0.69	0.58	0.45	14285.76	14285.76	14285.71	14285.71
3	1.43	1.36	1.13	1.00	12857.18	12857.14	12857.14	12857.14

Tabla 5. Presión de 60PSI

Potencia (W)					Frecuencia (Hz)			
Voltaje/capacitor	1	2	3	4	1	2	3	4
1	0.15	0.13	0.11	0.06	14285.76	14285.71	14285.71	14285.71
2	0.68	0.63	0.56	0.41	14285.76	14285.71	14285.71	14285.71
3	1.40	1.32	1.14	0.96	12857.18	12857.14	12857.14	12857.14

Tabla 6. Presión de 90PSI

Potencia (W)					Frecuencia (Hz)			
Voltaje/capacitor	1	2	3	4	1	2	3	4
1	0.15	0.12	0.11	0.05	14285.75	14285.71	14285.71	14285.71
2	0.67	0.61	0.57	0.41	14285.75	14285.71	14285.71	14285.71
3	1.28	1.23	1.11	0.92	12857.18	12857.14	12857.14	12857.14

De igual manera se muestran las figuras de Lissajous obtenidas para un ciclo de trabajo, la frecuencia de operación y la comparación entre los datos ajustados y sin ajustar. Los títulos corresponden a Voltaje 1 (V1), a una presión de 30, 60 o 90 PSI y posteriormente la etiqueta de capacitor. Considerando todas las combinaciones.

V1-30PSI

Capacitor 1

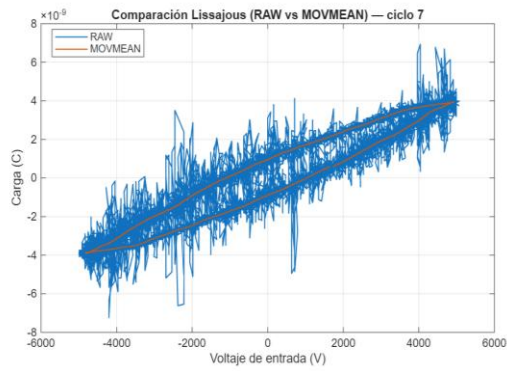


Figura 30. Comparación de la figura de Lissajous con ajuste

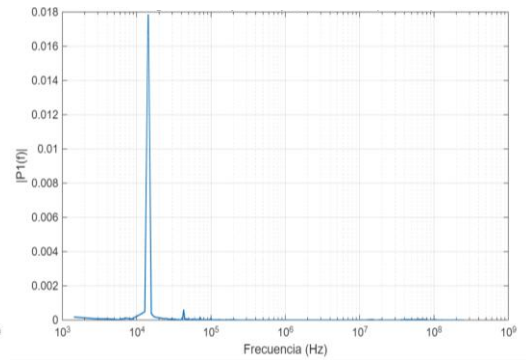


Figura 31. Frecuencia fundamental

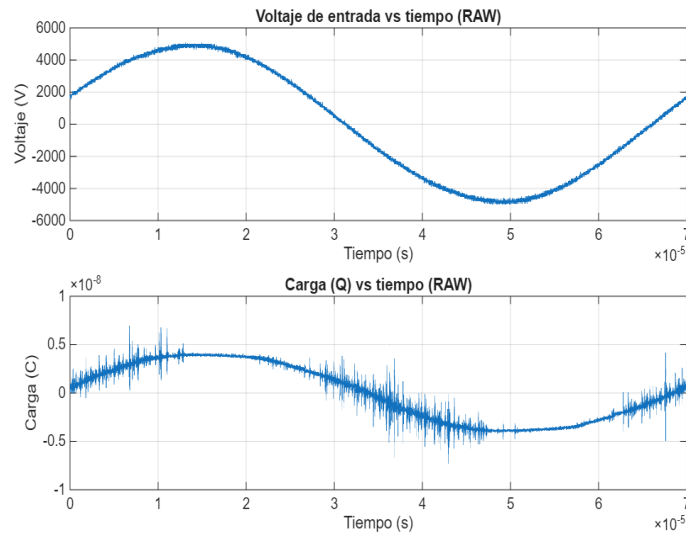


Figura 32. Voltaje de entrada y carga calculada vs tiempo

V1-30PSI

Capacitor 2

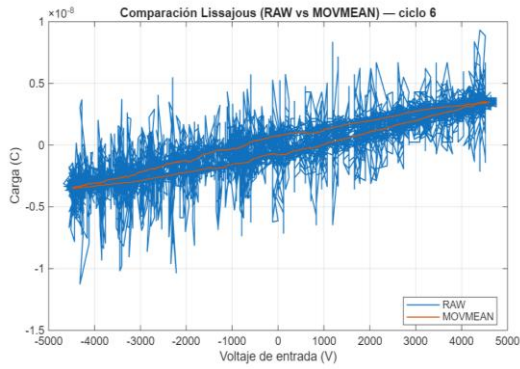


Figura 33. Comparación de la figura de Lissajous con ajuste

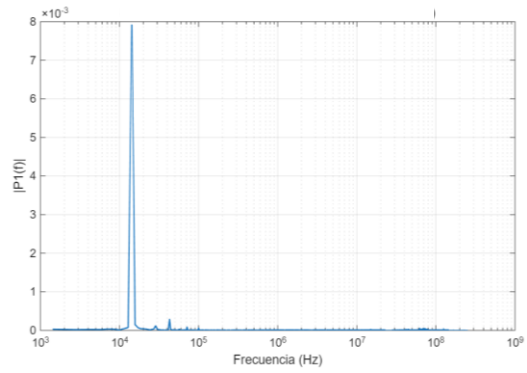


Figura 34. Frecuencia fundamental

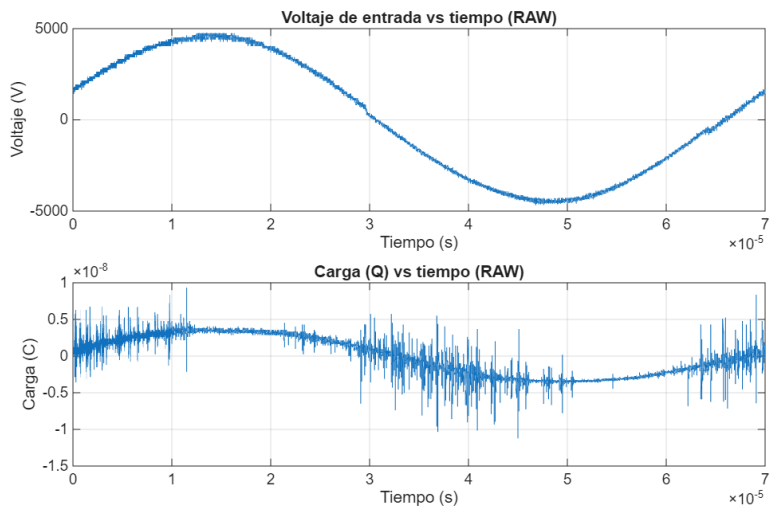


Figura 35. Voltaje de entrada y carga calculada vs tiempo

V1-30PSI

Capacitor 3

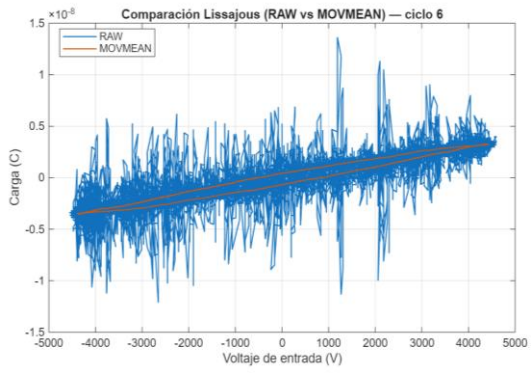


Figura 36. Comparación de la figura de Lissajous con ajuste

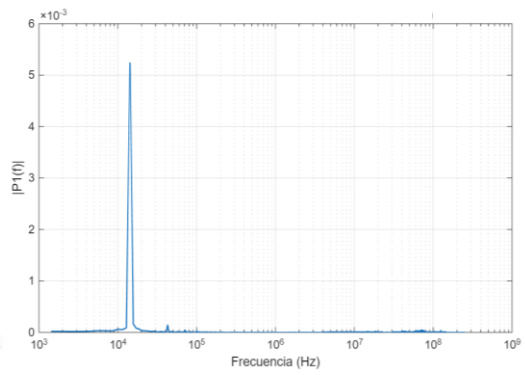


Figura 37. Frecuencia fundamental

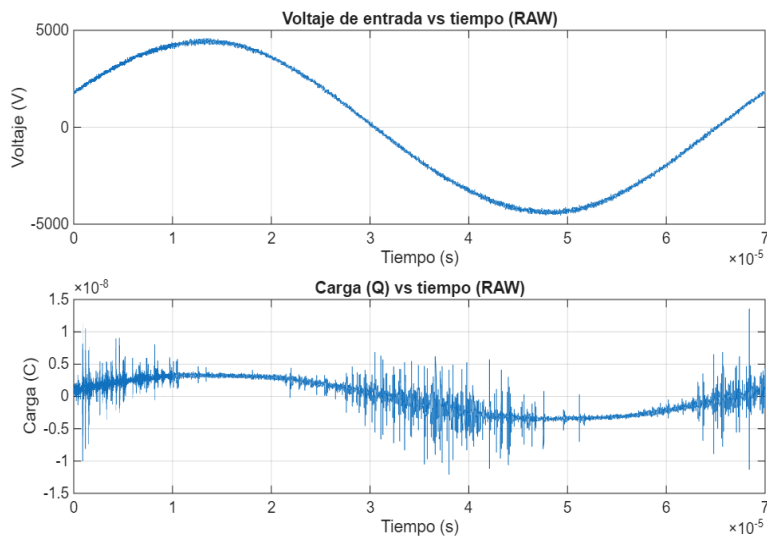


Figura 38. Voltaje de entrada y carga calculada vs tiempo

V1-30PSI

Capacitor 4

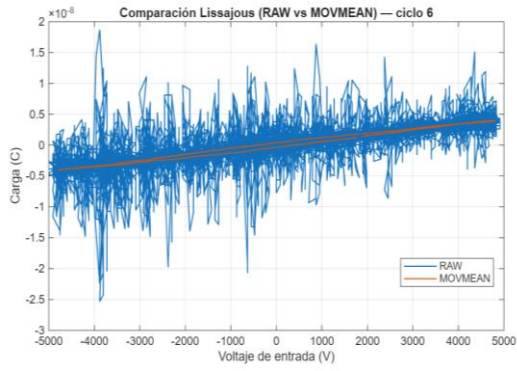


Figura 39. Comparación de la figura de Lissajous con ajuste

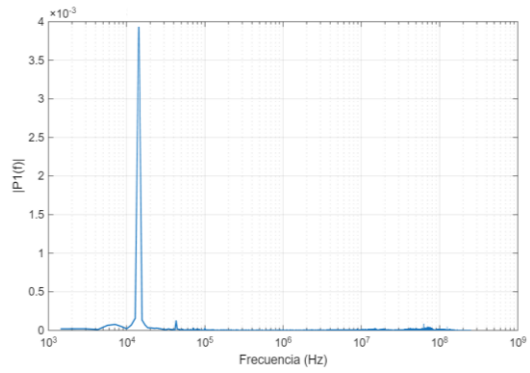


Figura 40. Frecuencia fundamental

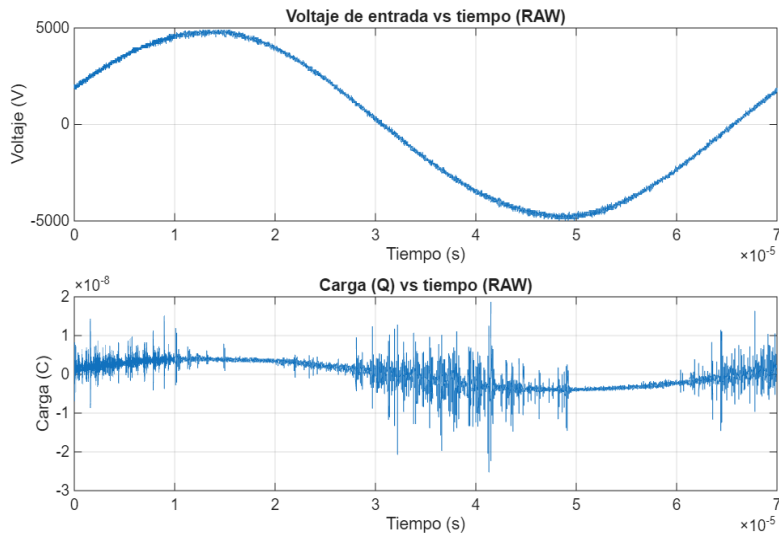


Figura 41. Voltaje de entrada y carga calculada vs tiempo

V2-30PSI

Capacitor 1

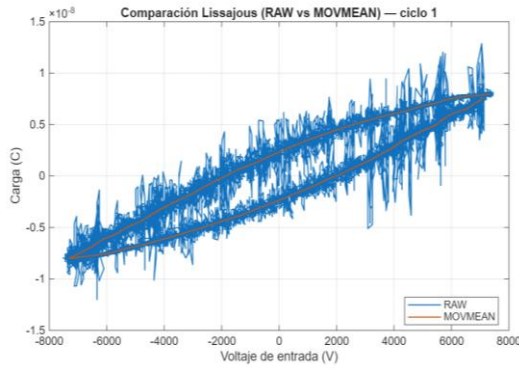


Figura 42. Comparación de la figura de Lissajous con ajuste

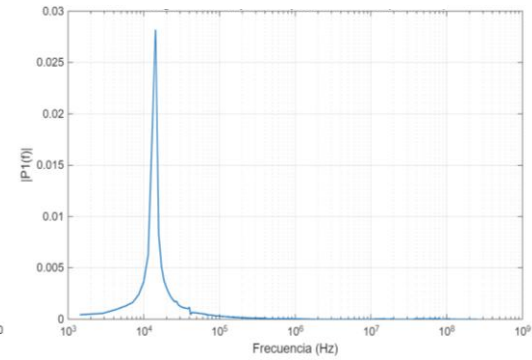


Figura 43. Frecuencia fundamental

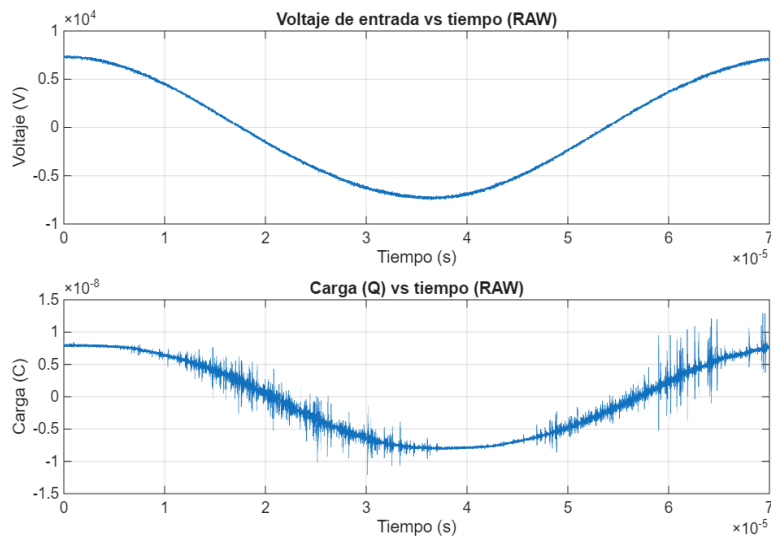


Figura 44. Voltaje de entrada y carga calculada vs tiempo

V2-30PSI

Capacitor 2

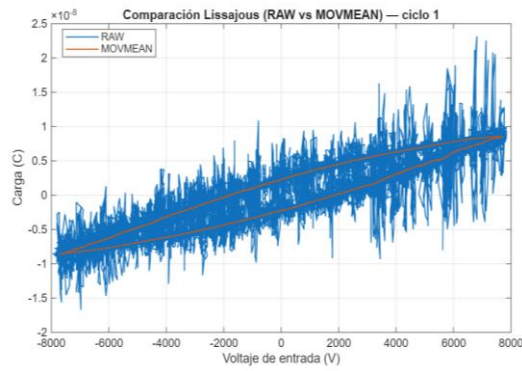


Figura 45. Comparación de la figura de Lissajous con ajuste

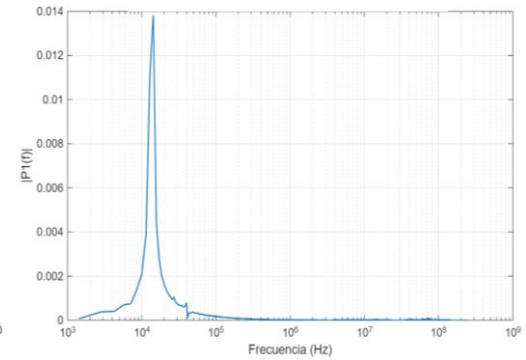


Figura 46. Frecuencia fundamental

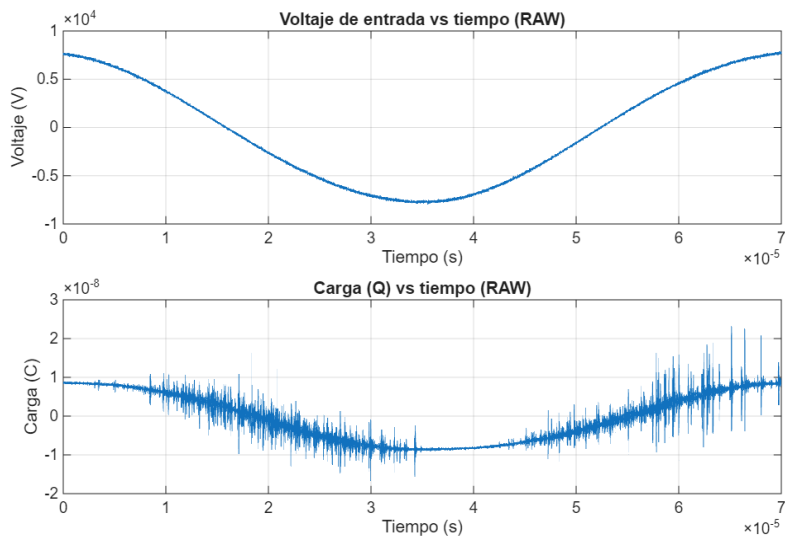


Figura 47. Voltaje de entrada y carga calculada vs tiempo

V2-30PSI

Capacitor 3

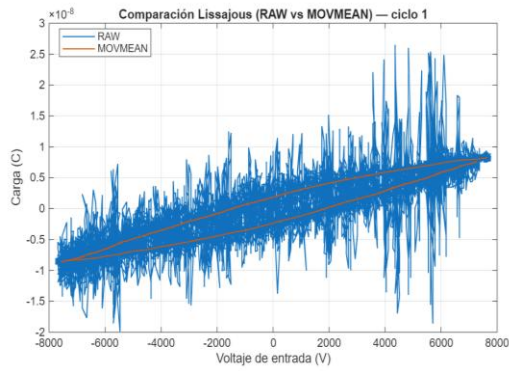


Figura 48. Comparación de la figura de Lissajous con ajuste

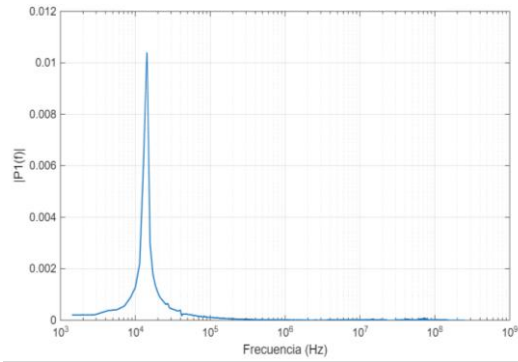


Figura 49. Frecuencia fundamental

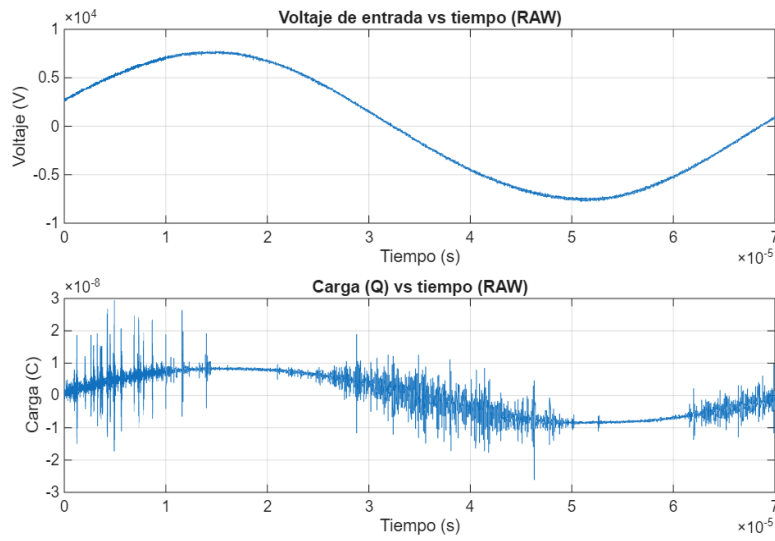


Figura 50. Voltaje de entrada y carga calculada vs tiempo

V2-30PSI

Capacitor 4

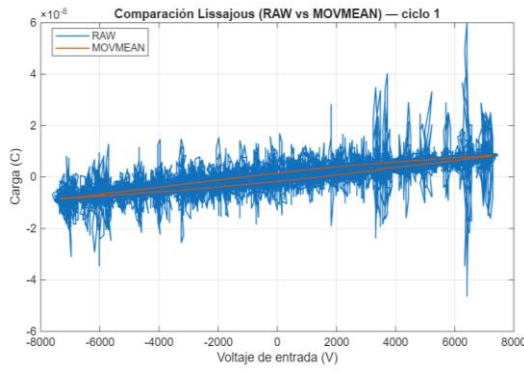


Figura 51. Comparación de la figura de Lissajous con ajuste

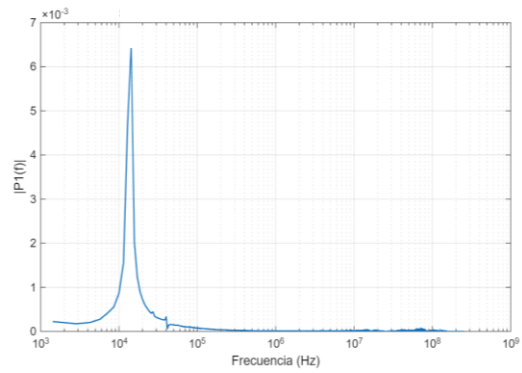


Figura 52. Frecuencia fundamental

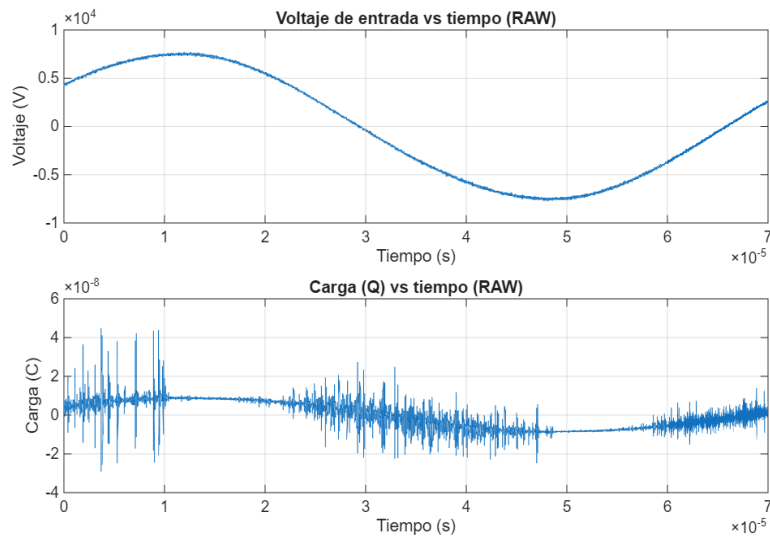


Figura 53. Voltaje de entrada y carga calculada vs tiempo

Capacitor 1

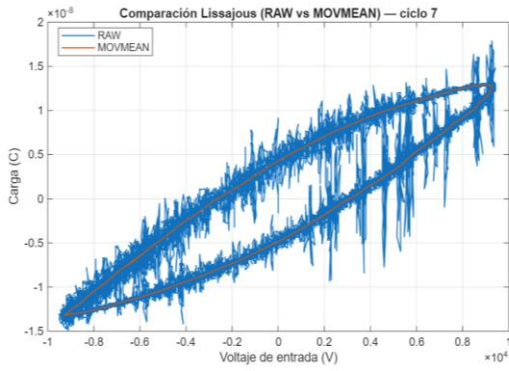


Figura 54. Comparación de la figura de Lissajous con ajuste

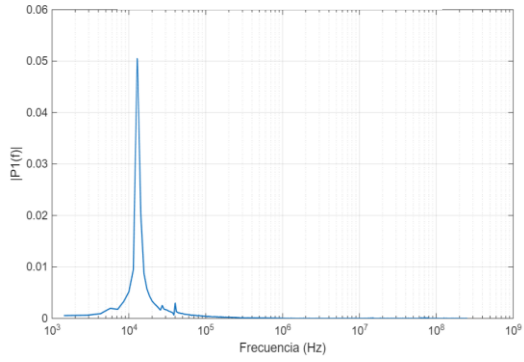


Figura 55. Frecuencia fundamental

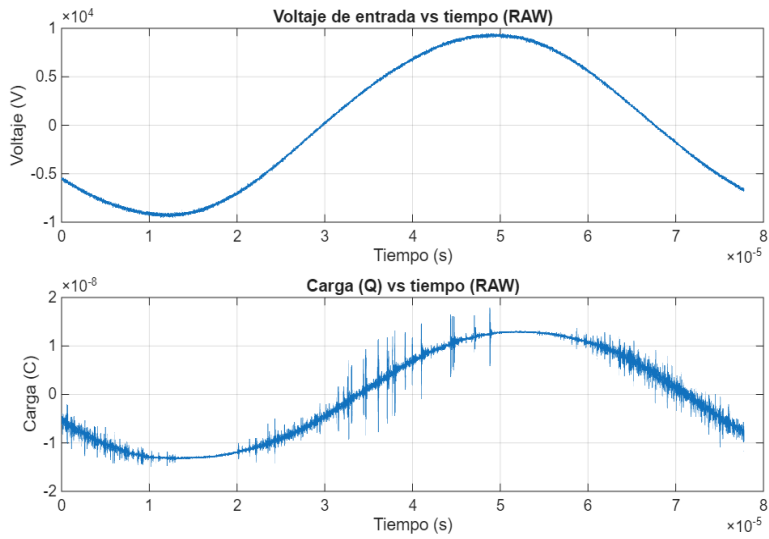


Figura 56. Voltaje de entrada y carga calculada vs tiempo

Capacitor 2

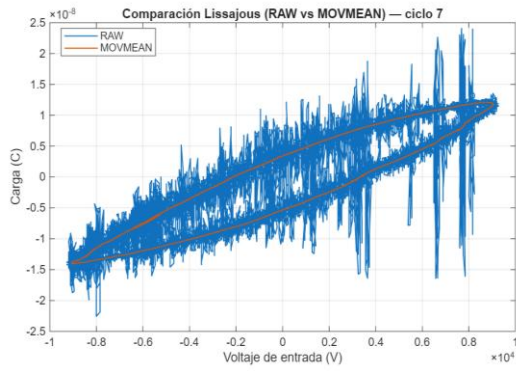


Figura 57. Comparación de la figura de Lissajous con ajuste

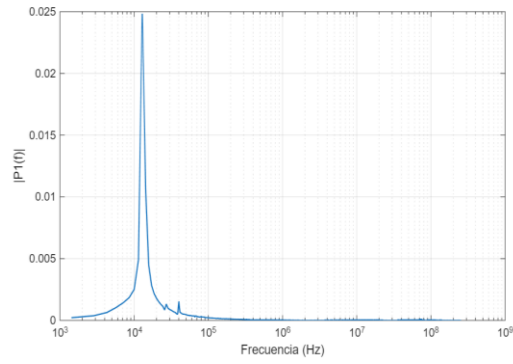


Figura 58. Frecuencia fundamental

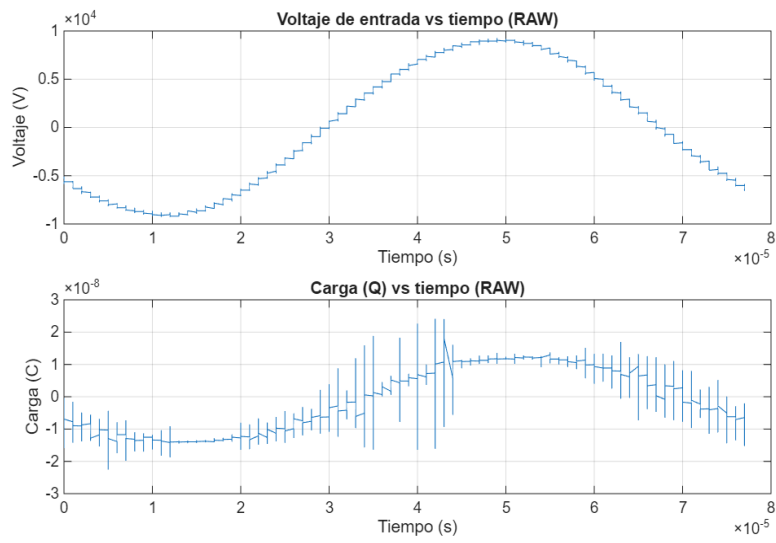


Figura 59. Voltaje de entrada y carga calculada vs tiempo

Capacitor 3

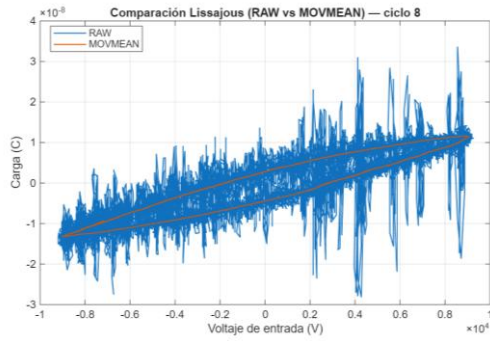


Figura 60. Comparación de la figura de Lissajous con ajuste

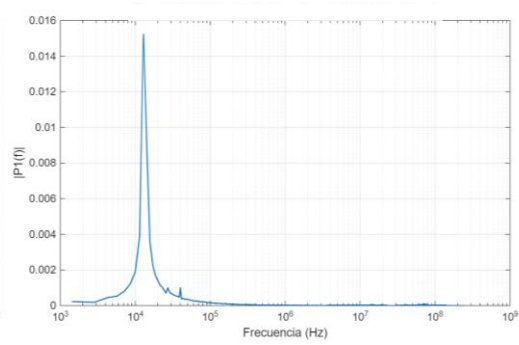


Figura 61. Frecuencia fundamental

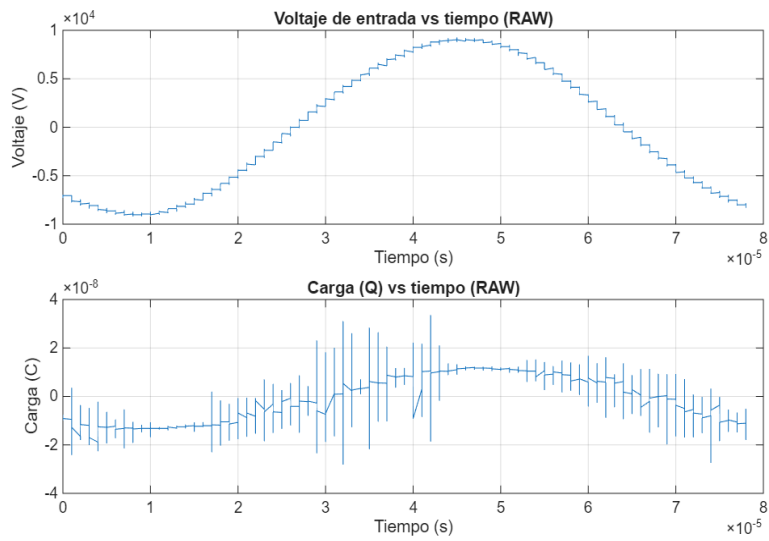


Figura 63. Voltaje de entrada y carga calculada vs tiempo

Capacitor 4

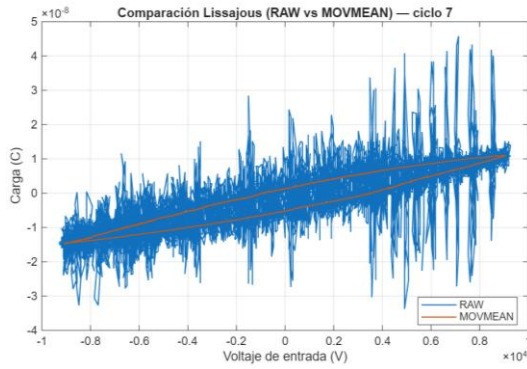


Figura 64. Comparación de la figura de Lissajous con ajuste

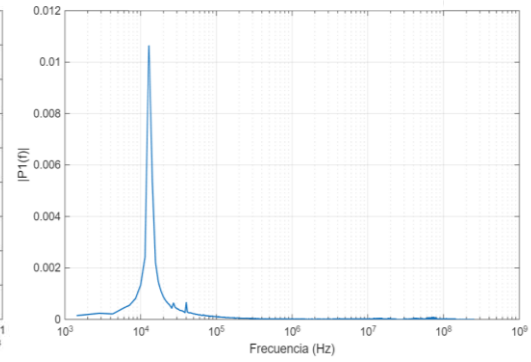


Figura 65. Frecuencia fundamental

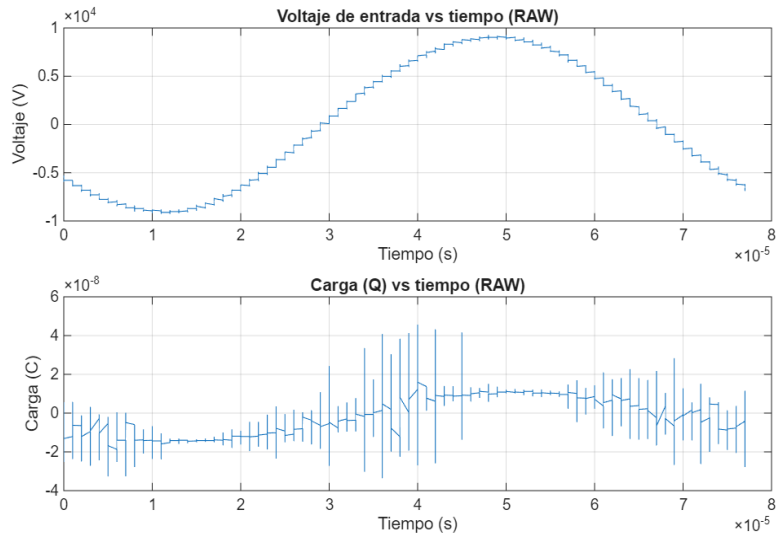


Figura 66. Voltaje de entrada y carga calculada vs tiempo

V1-60PSI

Capacitor 1

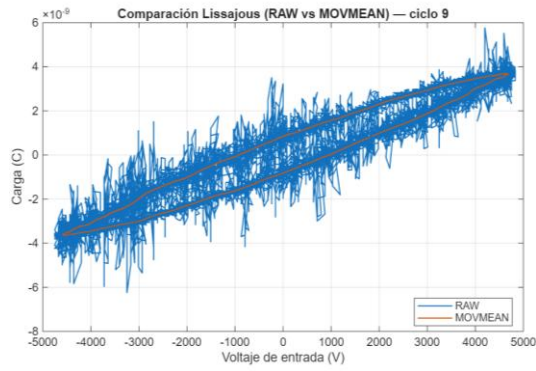


Figura 67. Comparación de la figura de Lissajous con ajuste

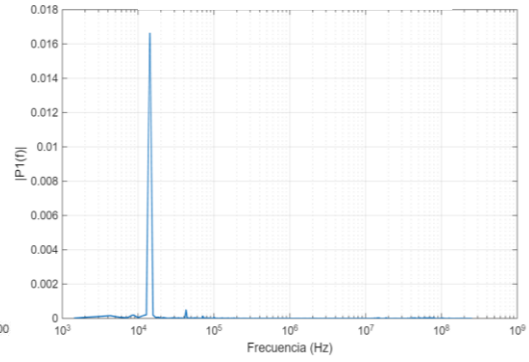


Figura 68. Frecuencia fundamental

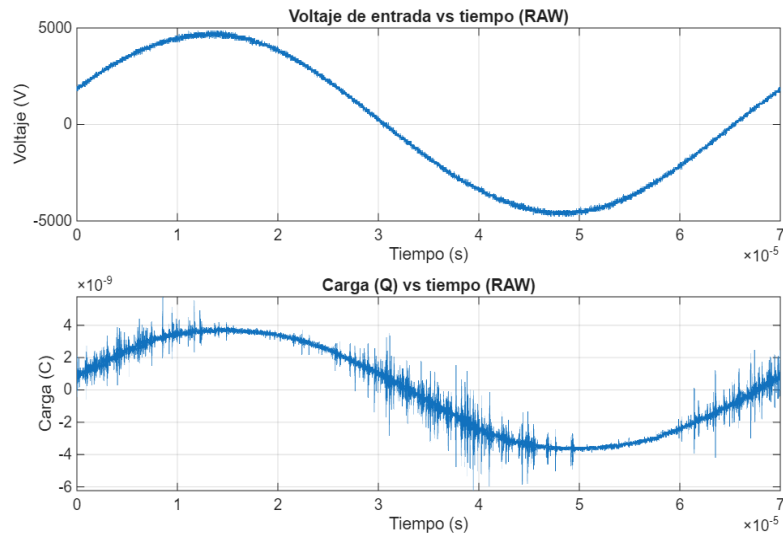


Figura 69. Voltaje de entrada y carga calculada vs tiempo

Capacitor 2

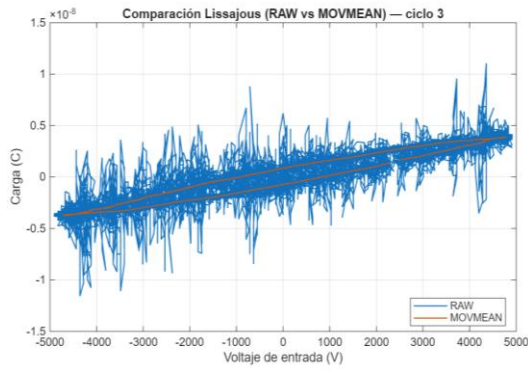


Figura 70. Comparación de la figura de Lissajous con ajuste

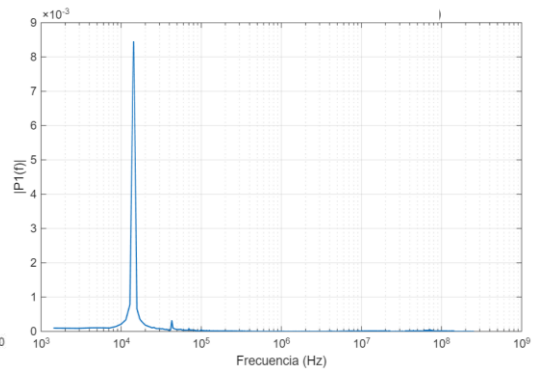


Figura 71. Frecuencia fundamental

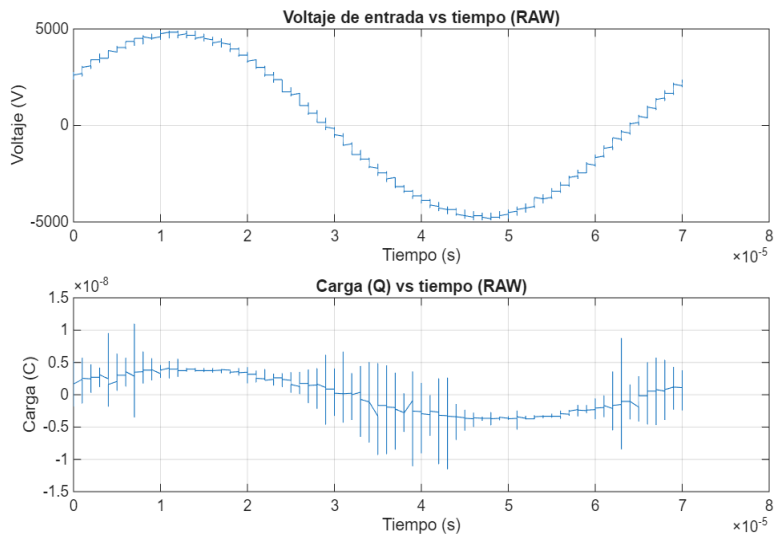


Figura 72. Voltaje de entrada y carga calculada vs tiempo

V1-60PSI

Capacitor 3

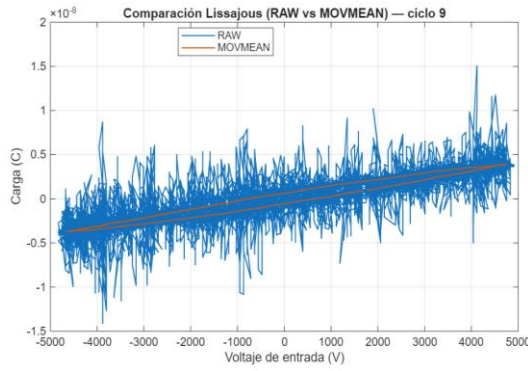


Figura 73. Comparación de la figura de Lissajous con ajuste

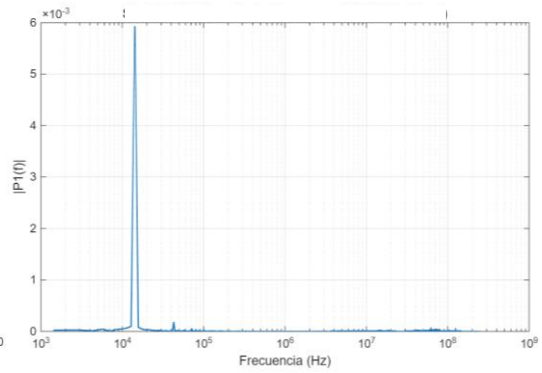


Figura 74. Frecuencia fundamental

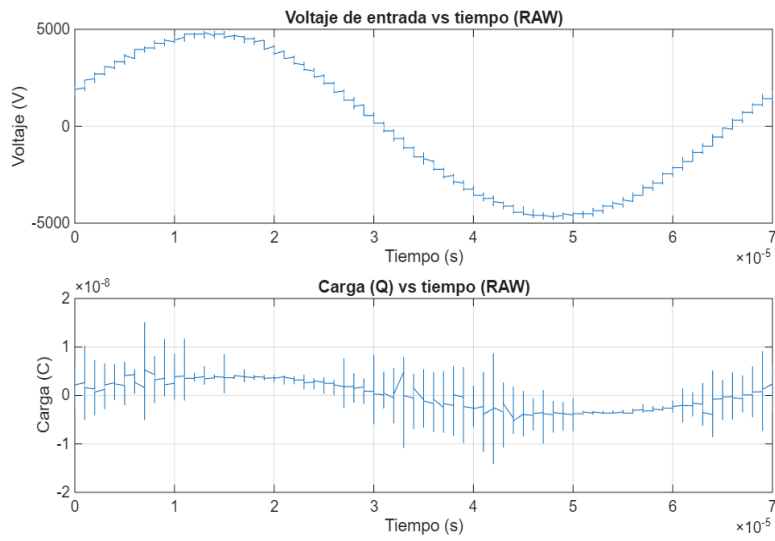


Figura 75. Voltaje de entrada y carga calculada vs tiempo

V1-60PSI

Capacitor 4

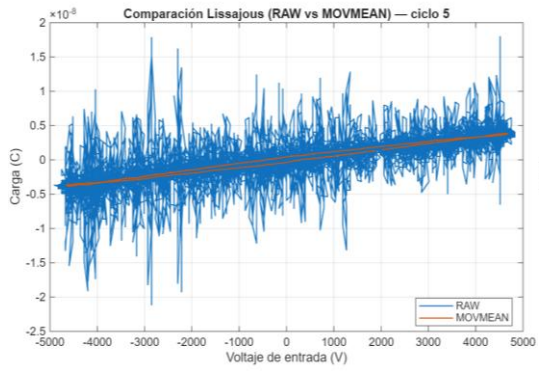


Figura 76. Comparación de la figura de Lissajous con ajuste

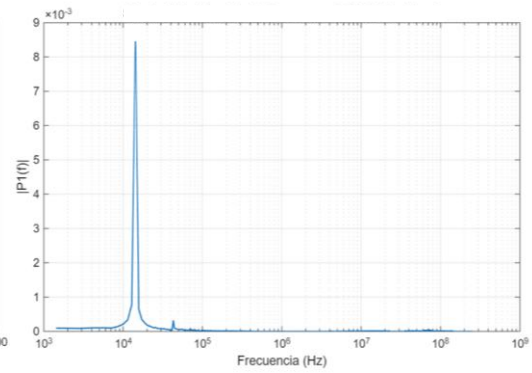


Figura 77. Frecuencia fundamental

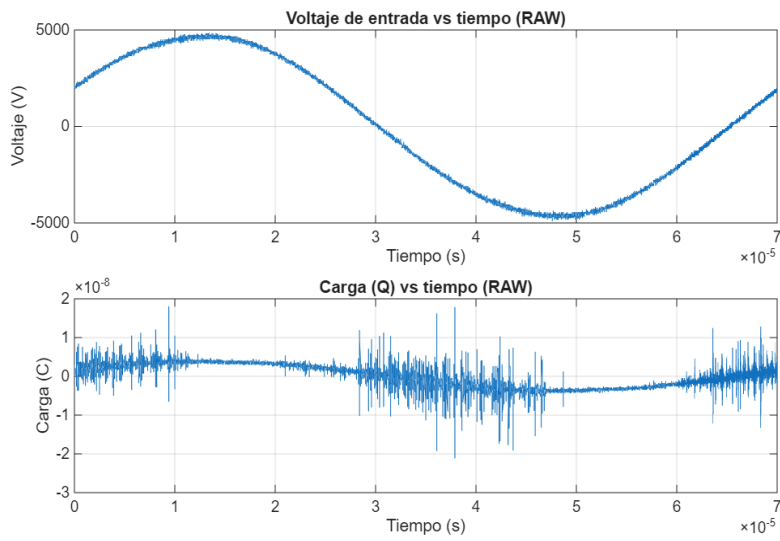


Figura 78. Voltaje de entrada y carga calculada vs tiempo

V2-60PSI

Capacitor 1

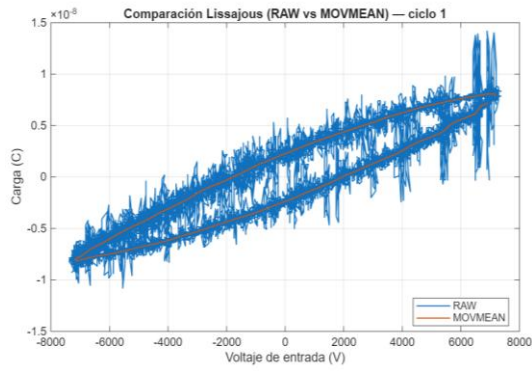


Figura 79. Comparación de la figura de Lissajous con ajuste

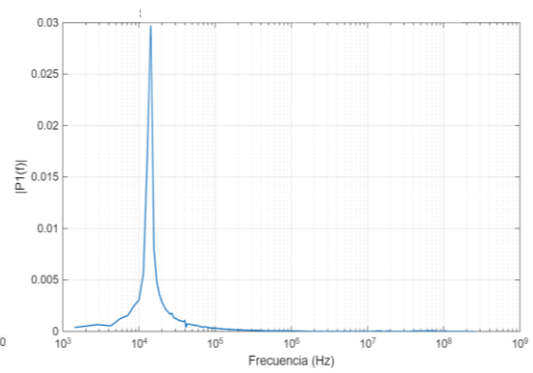


Figura 80. Frecuencia fundamental

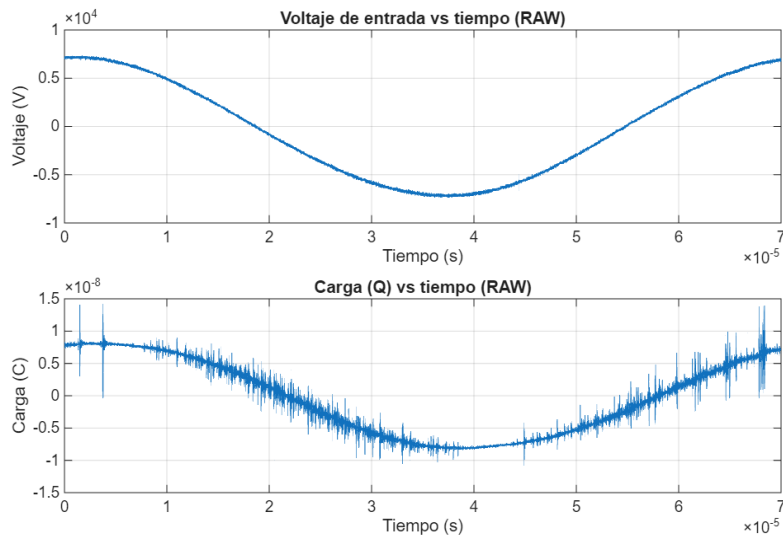


Figura 81. Voltaje de entrada y carga calculada vs tiempo

V2-60PSI

Capacitor 2

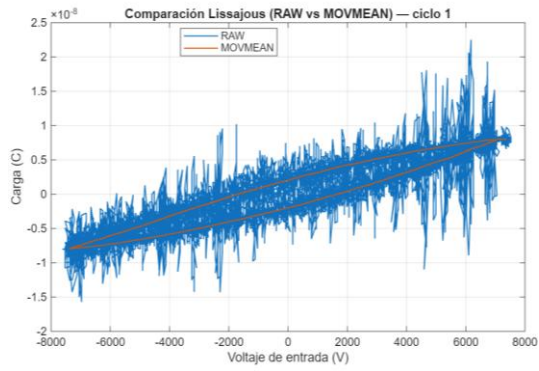


Figura 82. Comparación de la figura de Lissajous con ajuste

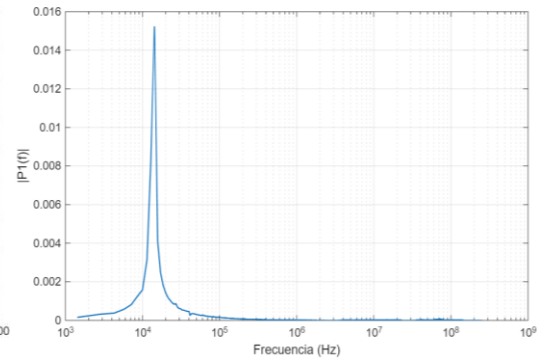


Figura 83. Frecuencia fundamental

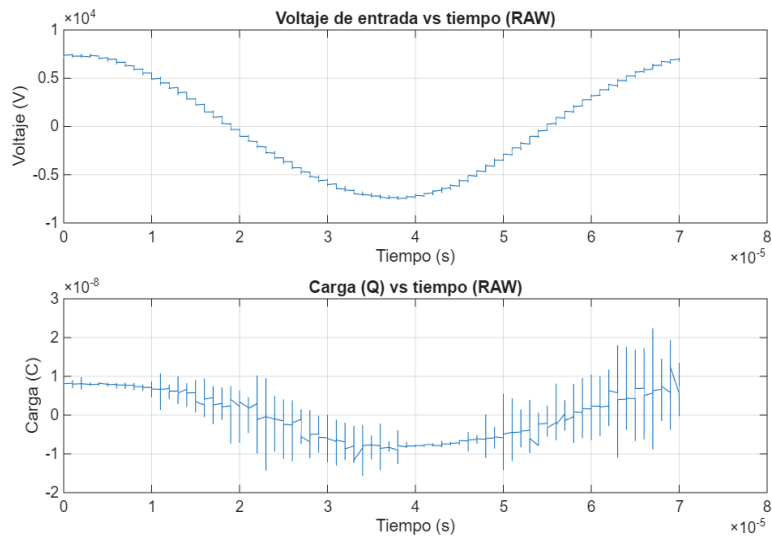


Figura 84. Voltaje de entrada y carga calculada vs tiempo

V2-60PSI

Capacitor 3

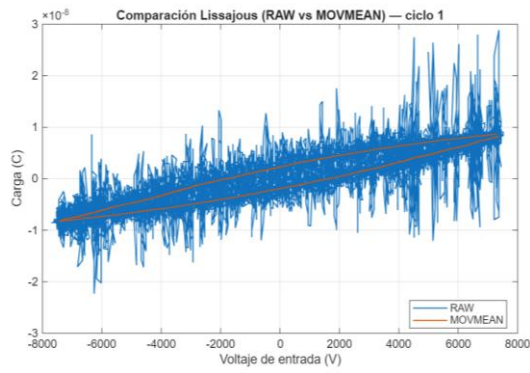


Figura 85. Comparación de la figura de Lissajous con ajuste

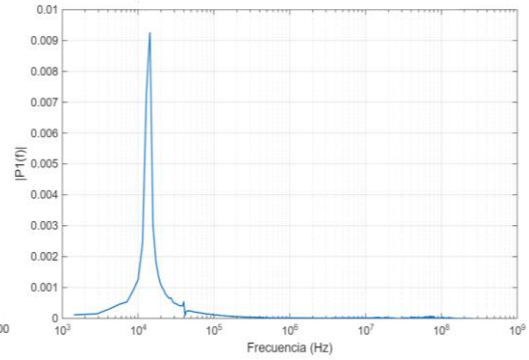


Figura 86. Frecuencia fundamental

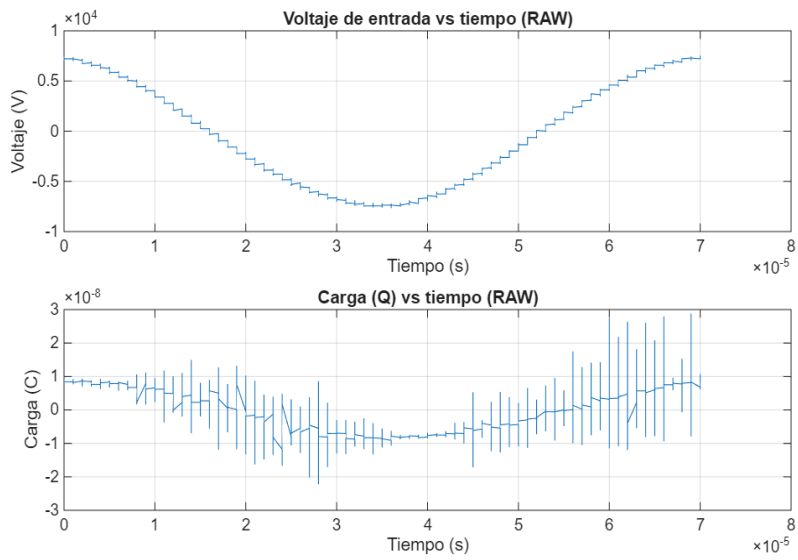


Figura 87. Voltaje de entrada y carga calculada vs tiempo

V2-60PSI

Capacitor 4

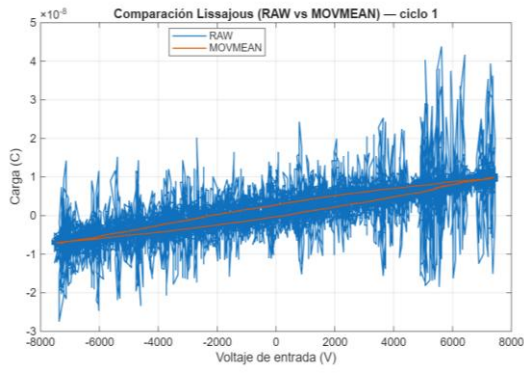


Figura 88. Comparación de la figura de Lissajous con ajuste

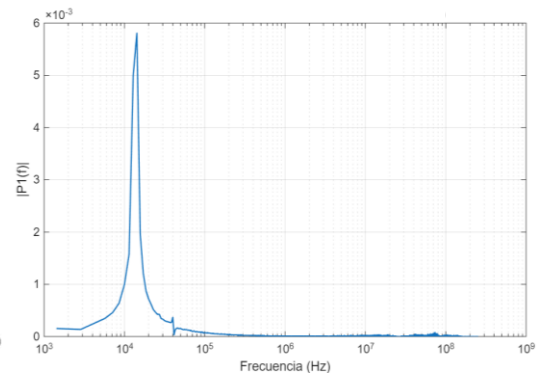


Figura 89. Frecuencia fundamental

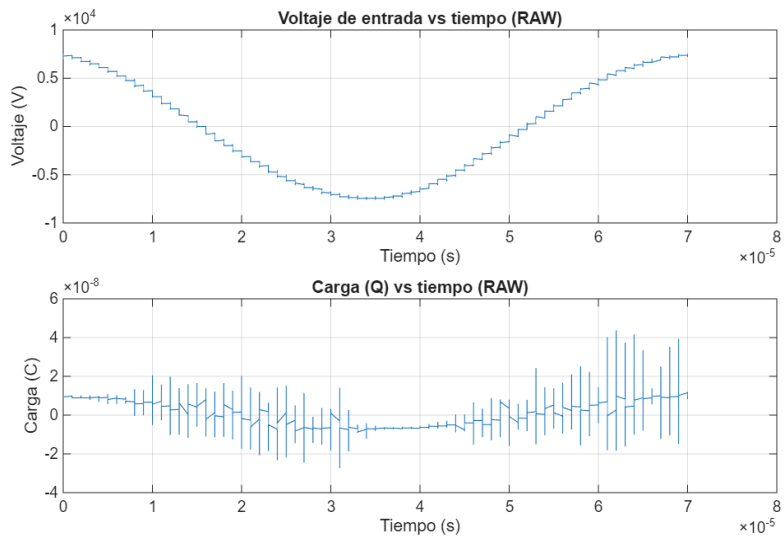


Figura 90. Voltaje de entrada y carga calculada vs tiempo

V3-60PSI

Capacitor 1

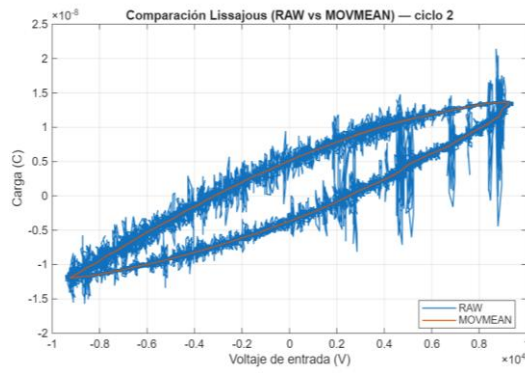


Figura 91. Comparación de la figura de Lissajous con ajuste

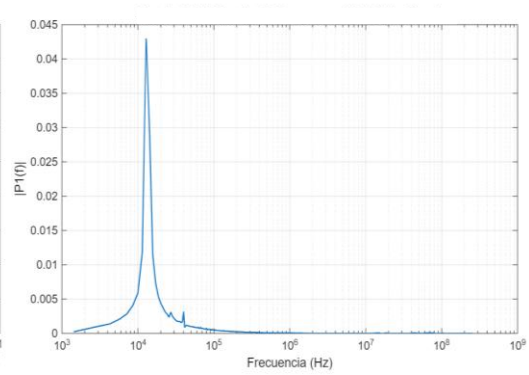


Figura 92. Frecuencia fundamental

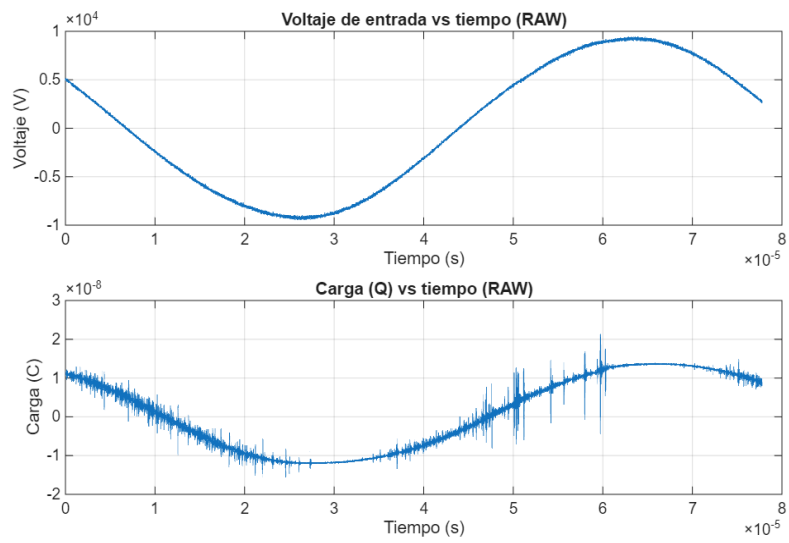


Figura 93. Voltaje de entrada y carga calculada vs tiempo

Capacitor 2

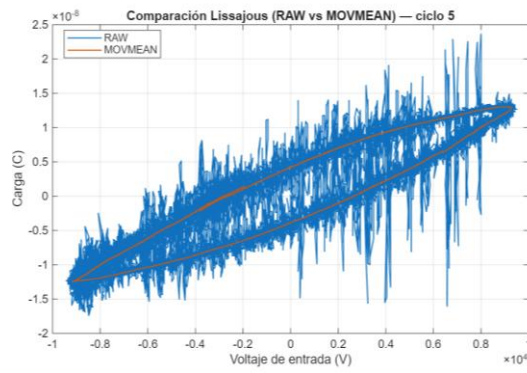


Figura 94. Comparación de la figura de Lissajous con ajuste

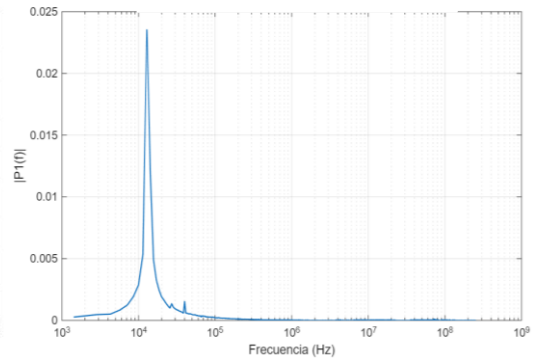


Figura 95. Frecuencia fundamental

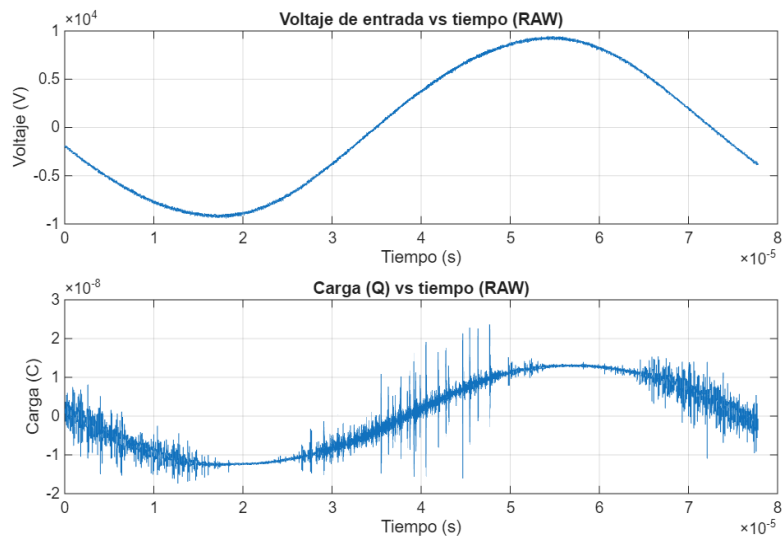


Figura 96. Voltaje de entrada y carga calculada vs tiempo

V3-60PSI

Capacitor 3

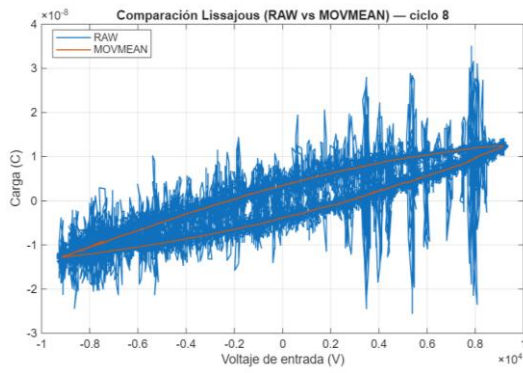


Figura 97. Comparación de la figura de Lissajous con ajuste

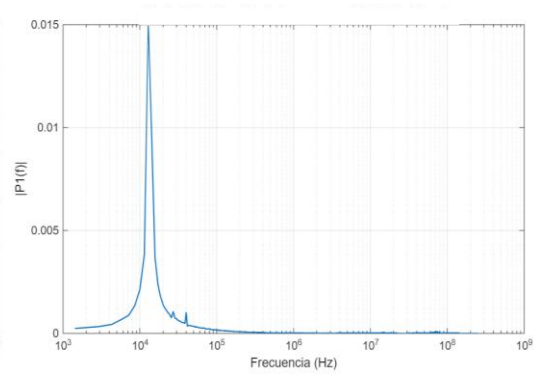


Figura 98. Frecuencia fundamental

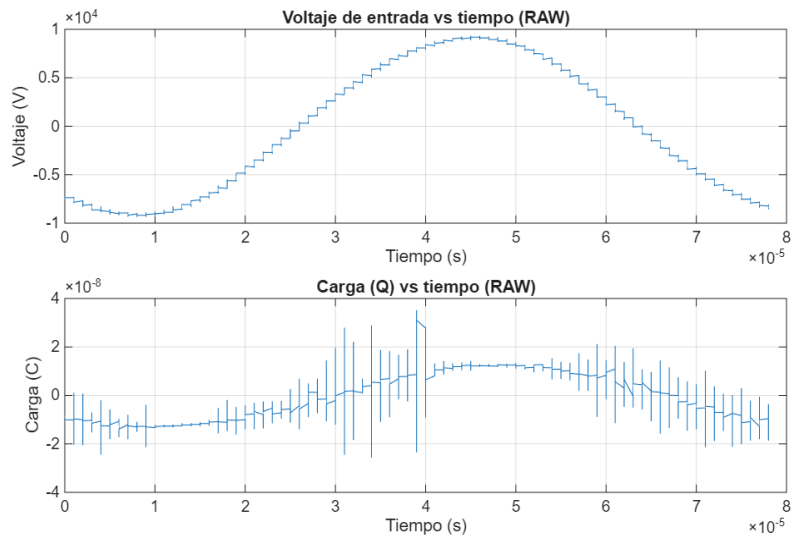


Figura 99. Voltaje de entrada y carga calculada vs tiempo

V3-60PSI

Capacitor 4

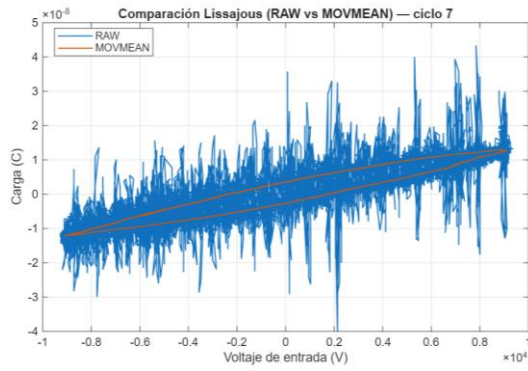


Figura 100. Comparación de la figura de Lissajous con ajuste

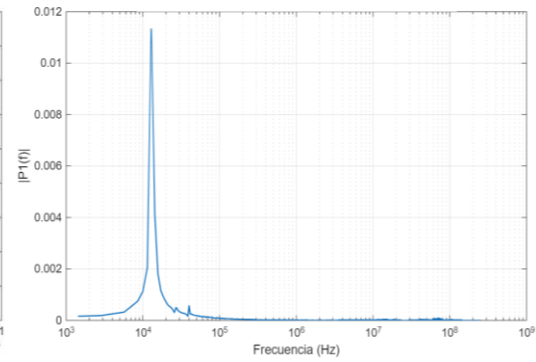


Figura 101. Frecuencia fundamental

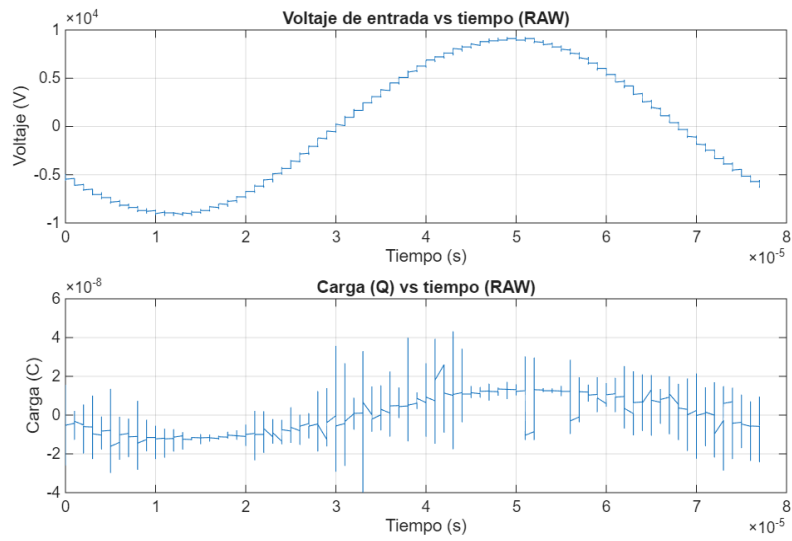


Figura 102. Voltaje de entrada y carga calculada vs tiempo

V1-90PSI

Capacitor 1

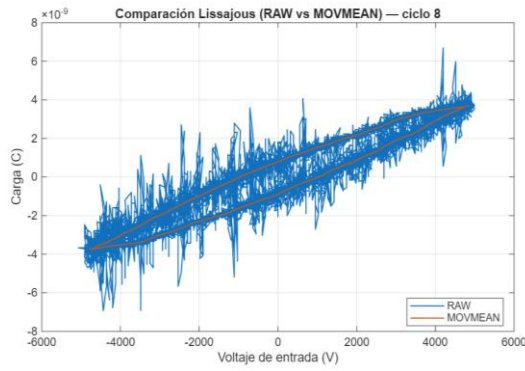


Figura 103. Comparación de la figura de Lissajous con ajuste

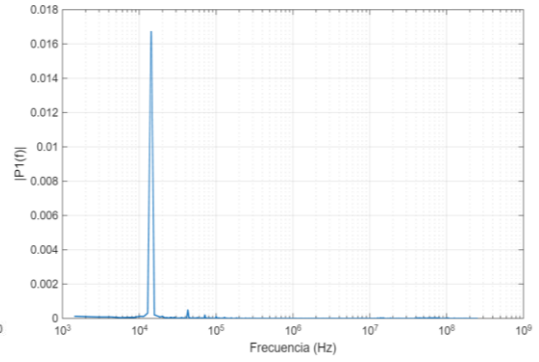


Figura 104. Frecuencia fundamental

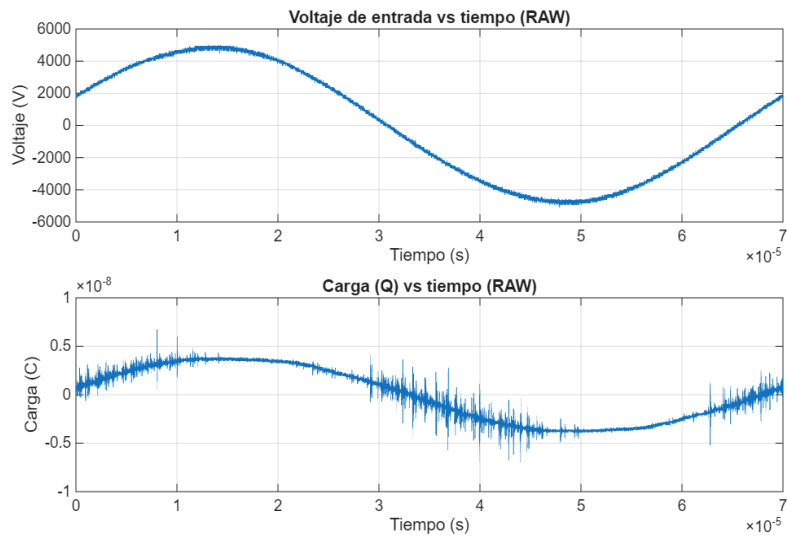


Figura 105. Voltaje de entrada y carga calculada vs tiempo

V1-90PSI

Capacitor 2

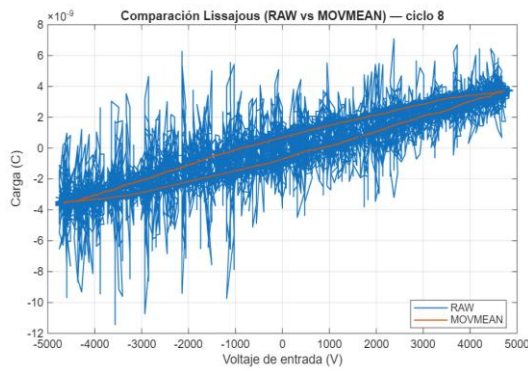


Figura 106. Comparación de la figura de Lissajous con ajuste

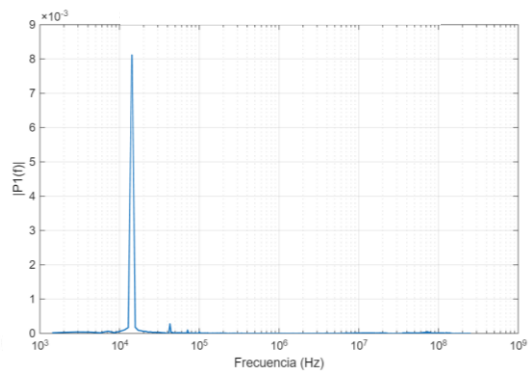


Figura 107. Frecuencia fundamental

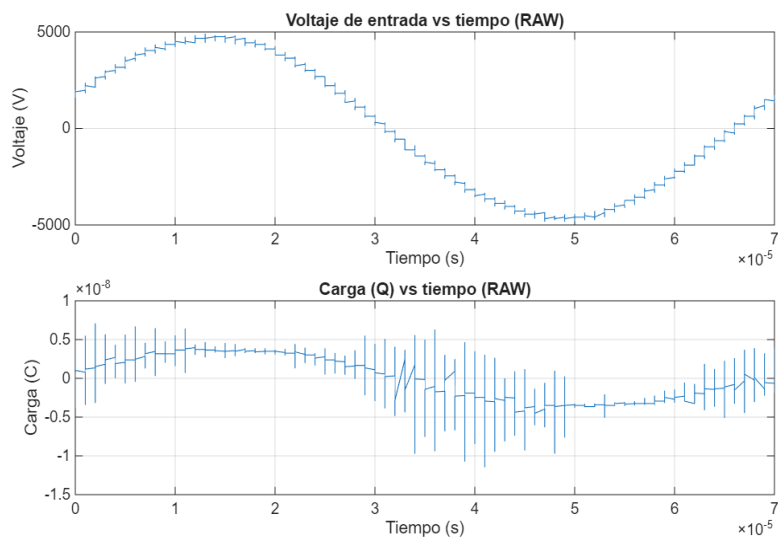


Figura 108. Voltaje de entrada y carga calculada vs tiempo

V1-90PSI

Capacitor 3

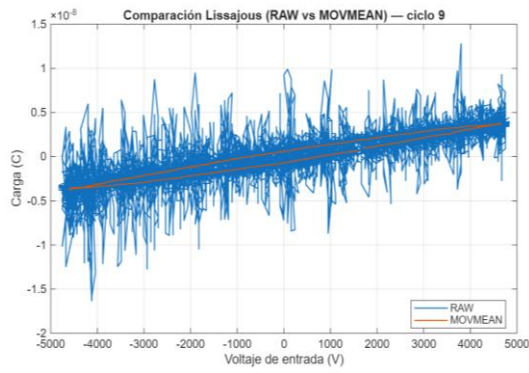


Figura 109. Comparación de la figura de Lissajous con ajuste

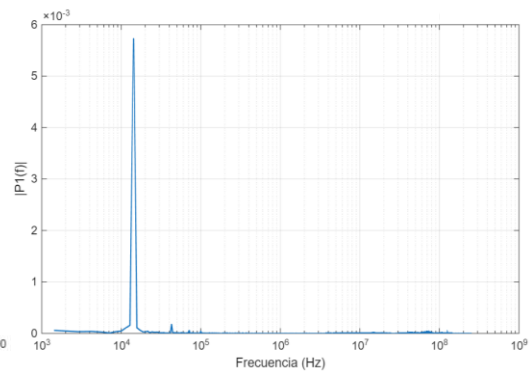


Figura 110. Frecuencia fundamental

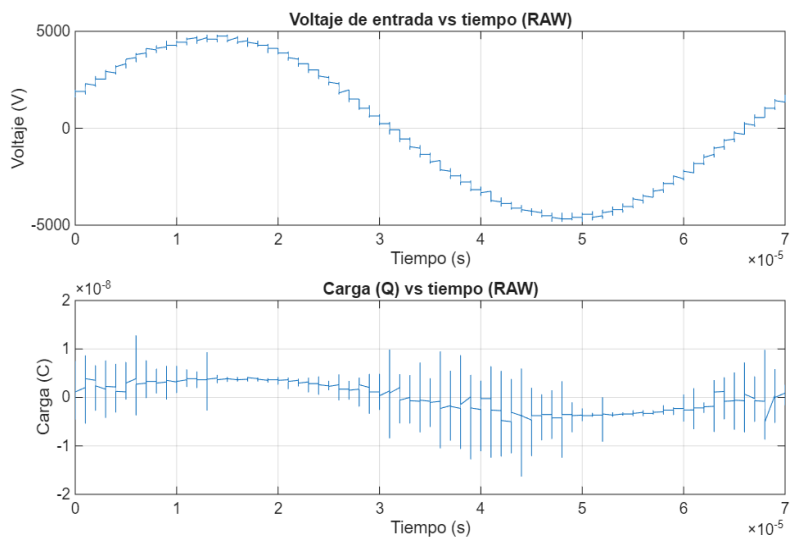


Figura 111. Voltaje de entrada y carga calculada vs tiempo

V1-90PSI

Capacitor 4

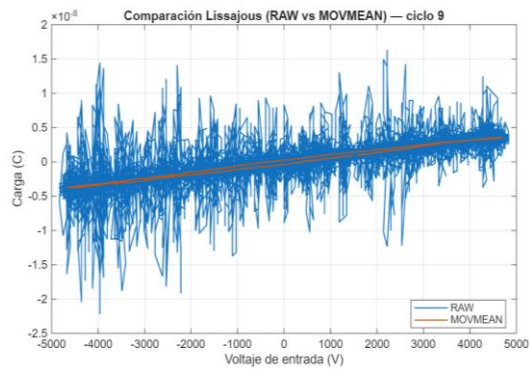


Figura 112. Comparación de la figura de Lissajous con ajuste

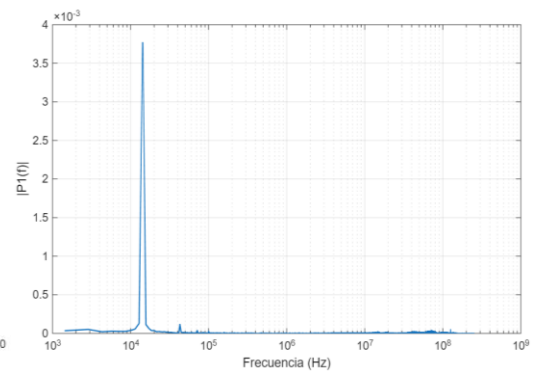


Figura 113. Frecuencia fundamental

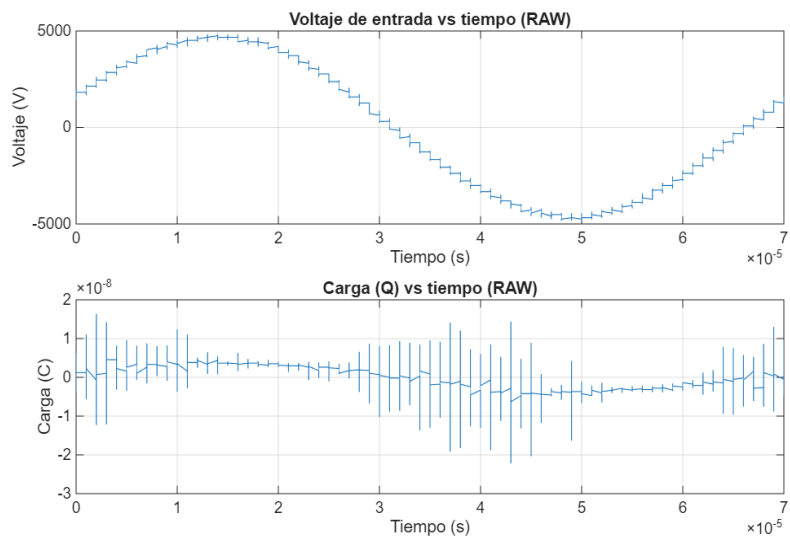


Figura 114. Voltaje de entrada y carga calculada vs tiempo

V2-90PSI

Capacitor 1

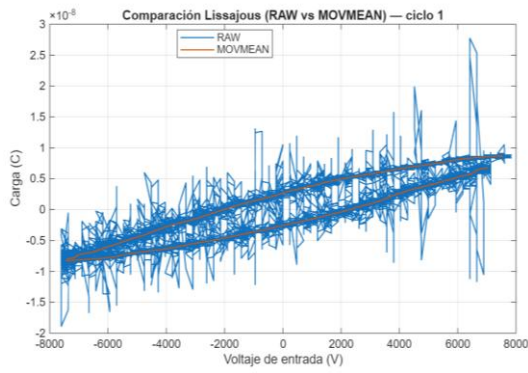


Figura 115. Comparación de la figura de Lissajous con ajuste

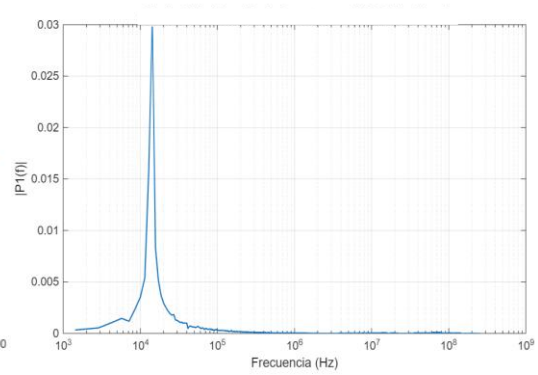


Figura 116. Frecuencia fundamental

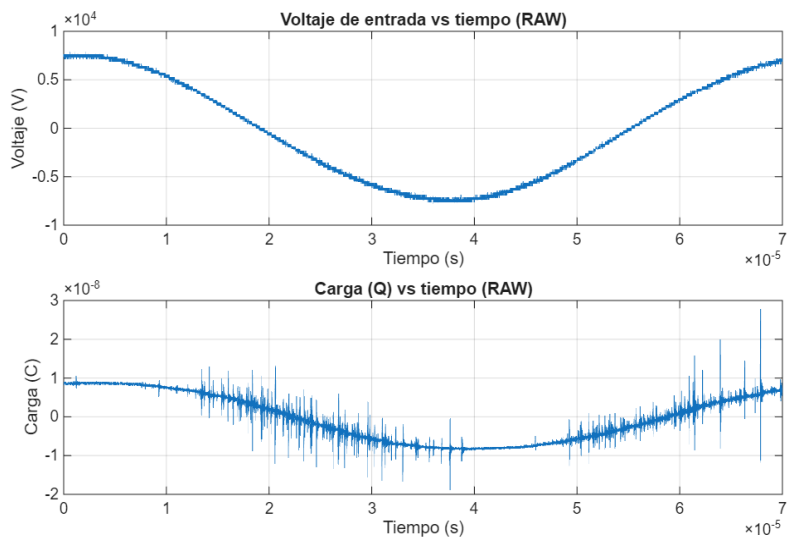


Figura 117. Voltaje de entrada y carga calculada vs tiempo

Capacitor 2

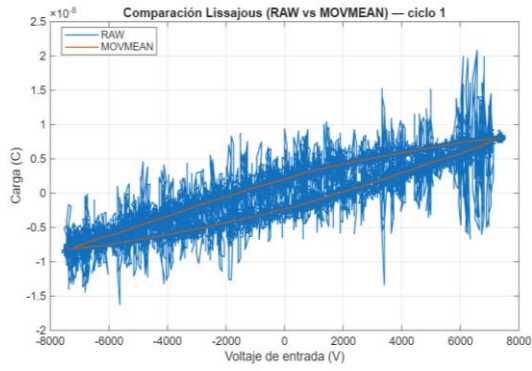


Figura 118. Comparación de la figura de Lissajous con ajuste

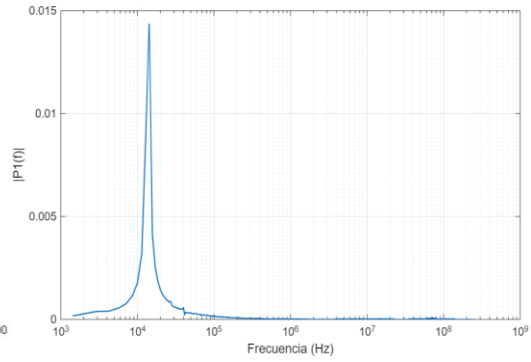


Figura 119. Frecuencia fundamental

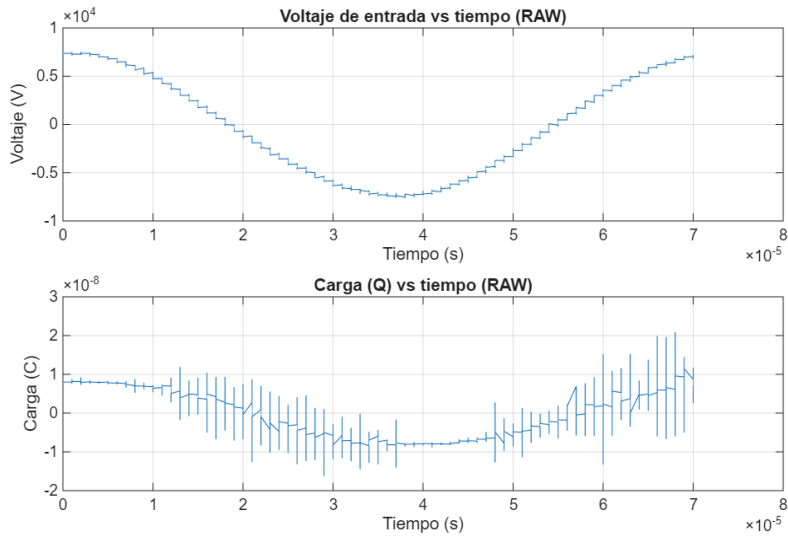


Figura 120. Voltaje de entrada y carga calculada vs tiempo

V2-90PSI

Capacitor 3

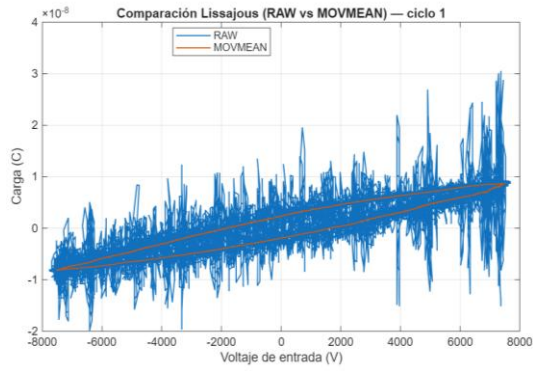


Figura 121. Comparación de la figura de Lissajous con ajuste

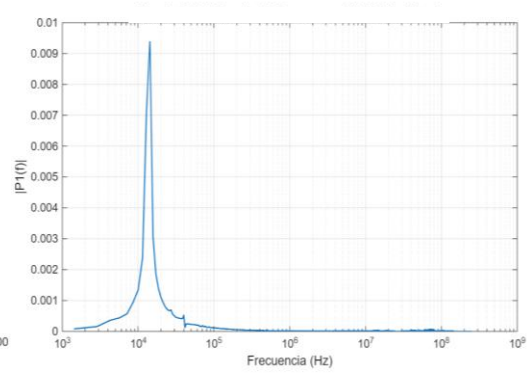


Figura 122. Frecuencia fundamental

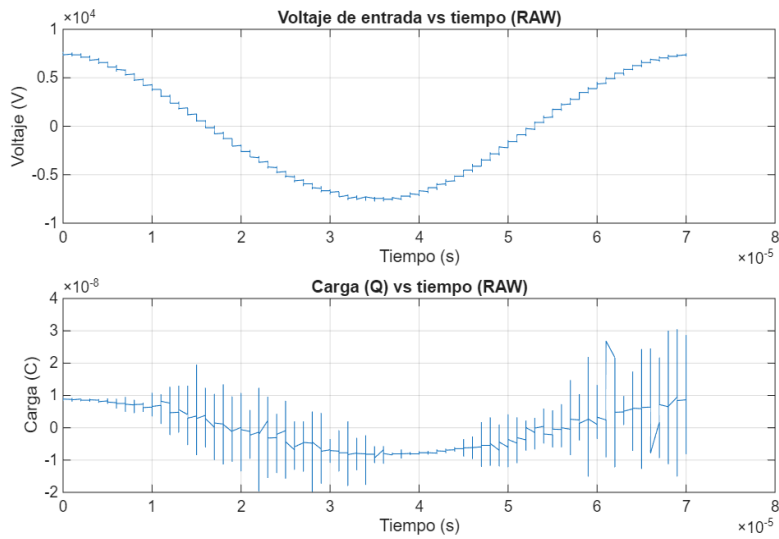


Figura 123. Voltaje de entrada y carga calculada vs tiempo

V2-90PSI

Capacitor 4

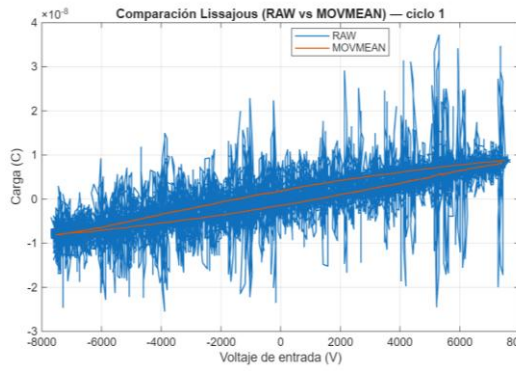


Figura 124. Comparación de la figura de Lissajous con ajuste

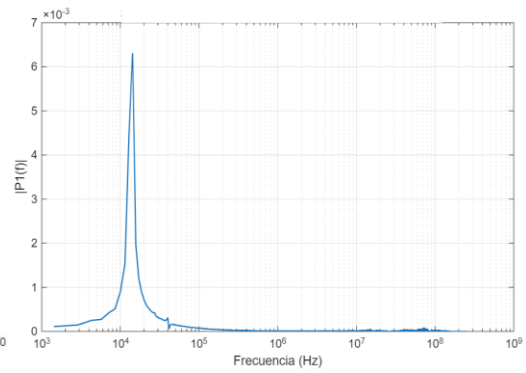


Figura 125. Frecuencia fundamental

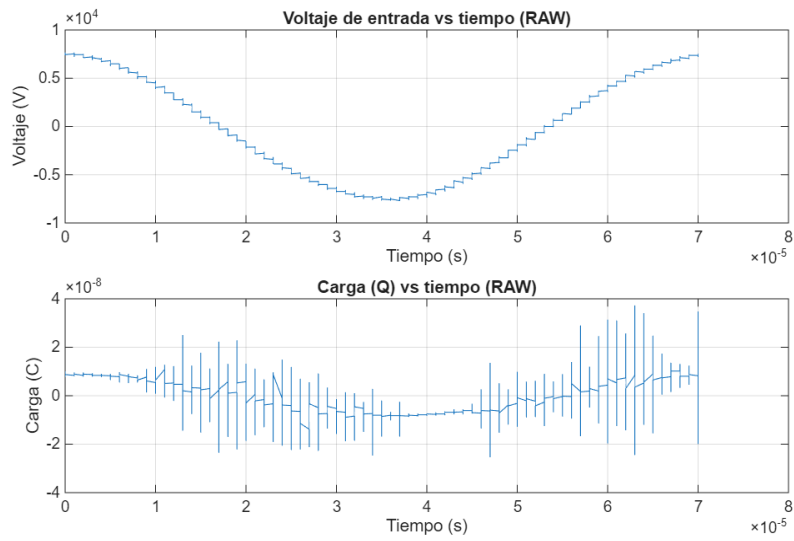


Figura 126. Voltaje de entrada y carga calculada vs tiempo

V3-90PSI

Capacitor 1

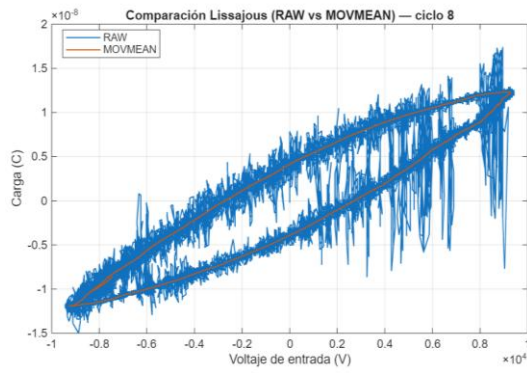


Figura 127. Comparación de la figura de Lissajous con ajuste

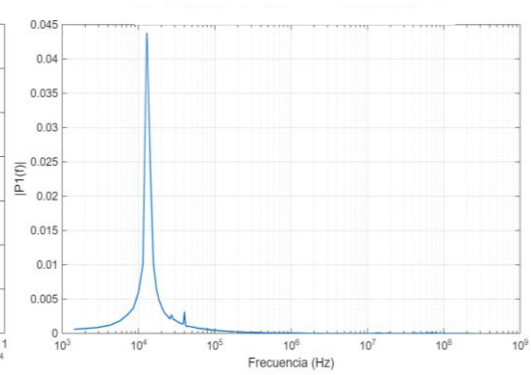


Figura 128. Frecuencia fundamental

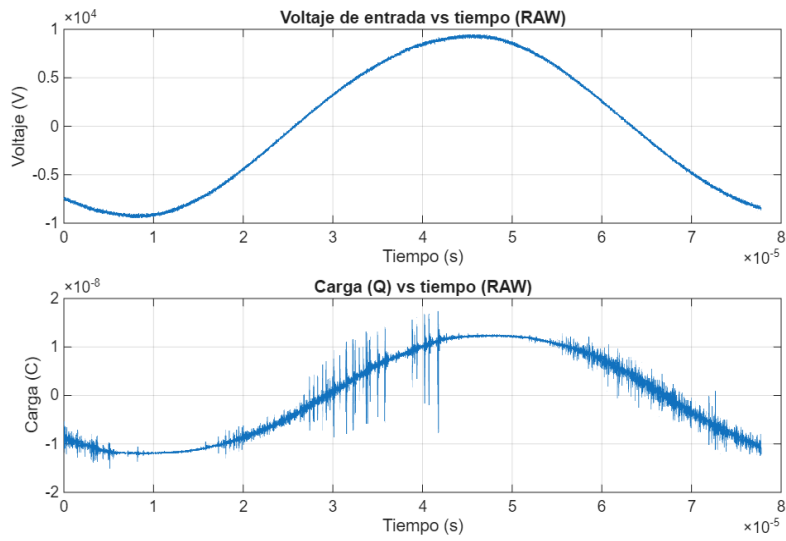


Figura 129. Voltaje de entrada y carga calculada vs tiempo

V3-90PSI

Capacitor 2

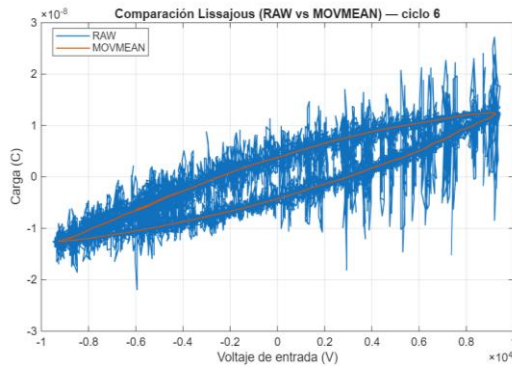


Figura 130. Comparación de la figura de Lissajous con ajuste

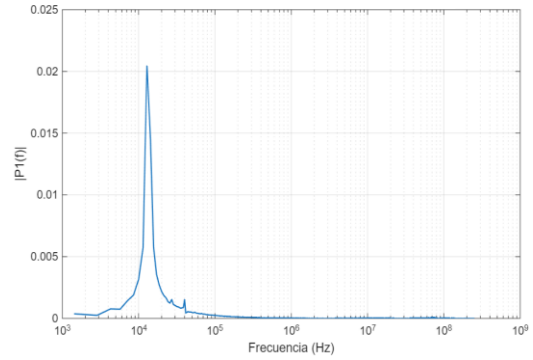


Figura 131. Frecuencia fundamental

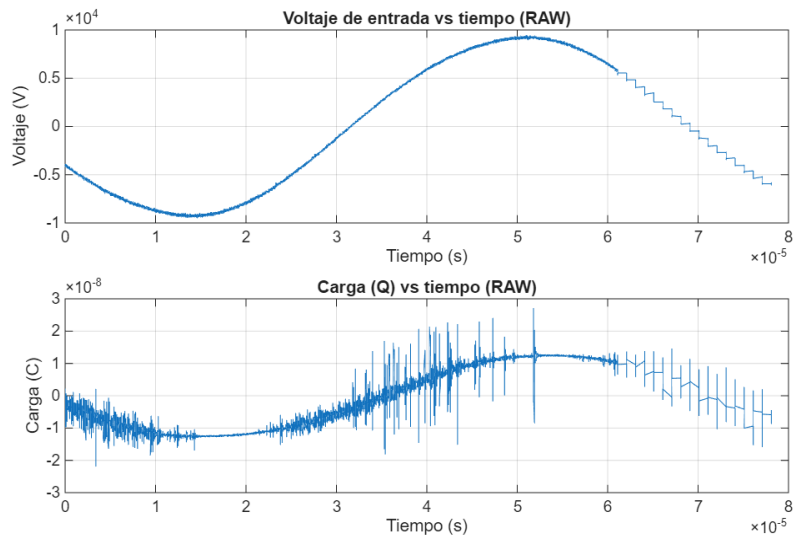


Figura 132. Voltaje de entrada y carga calculada vs tiempo

V3-90PSI

Capacitor 3

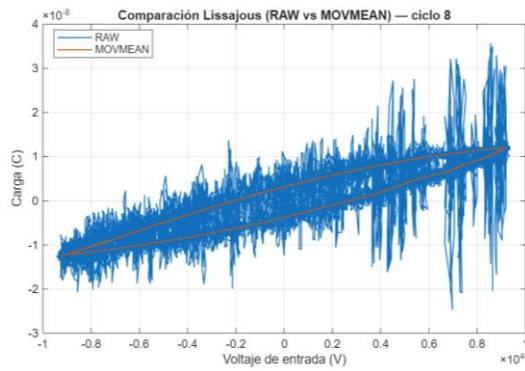


Figura 133. Comparación de la figura de Lissajous con ajuste

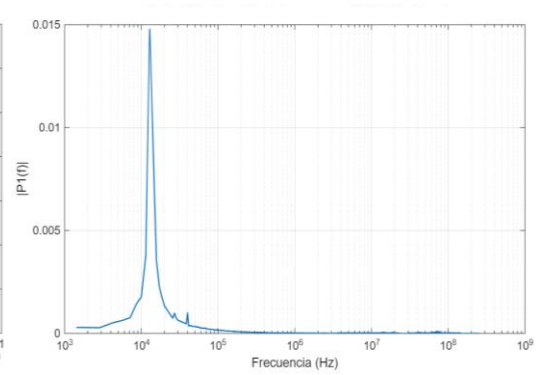


Figura 134. Frecuencia fundamental

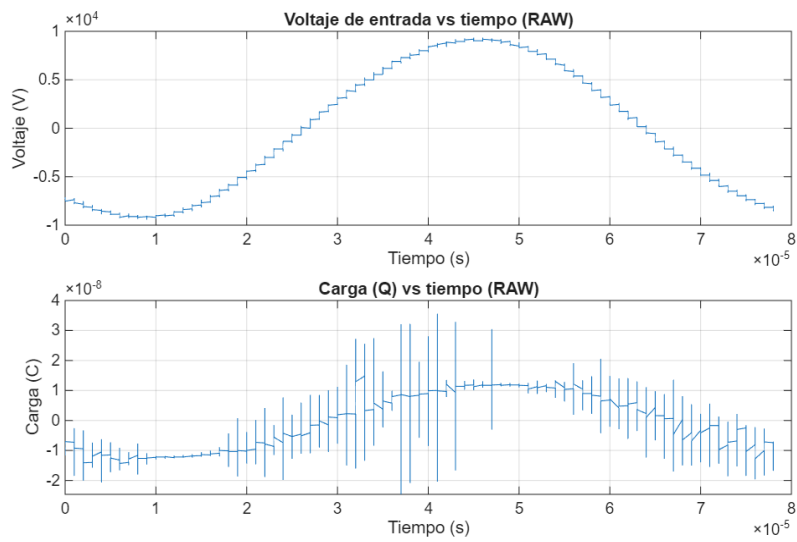


Figura 135. Voltaje de entrada y carga calculada vs tiempo

Capacitor 4

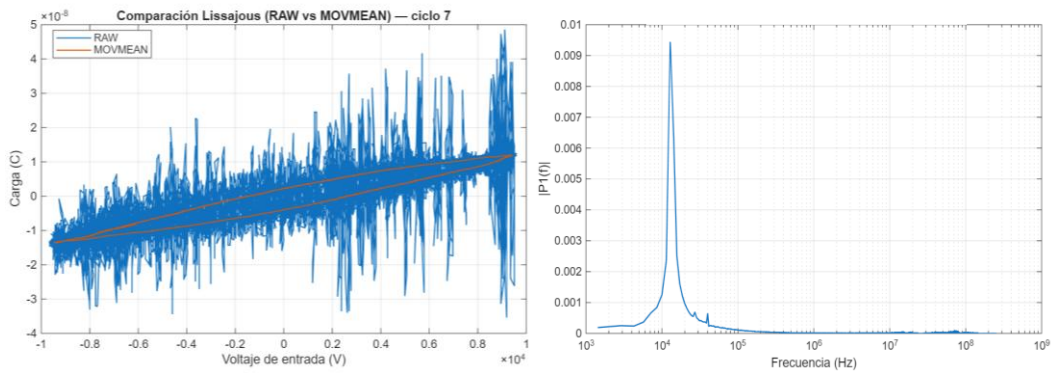


Figura 136. Comparación de la figura de Lissajous con ajuste

Figura 137. Frecuencia fundamental

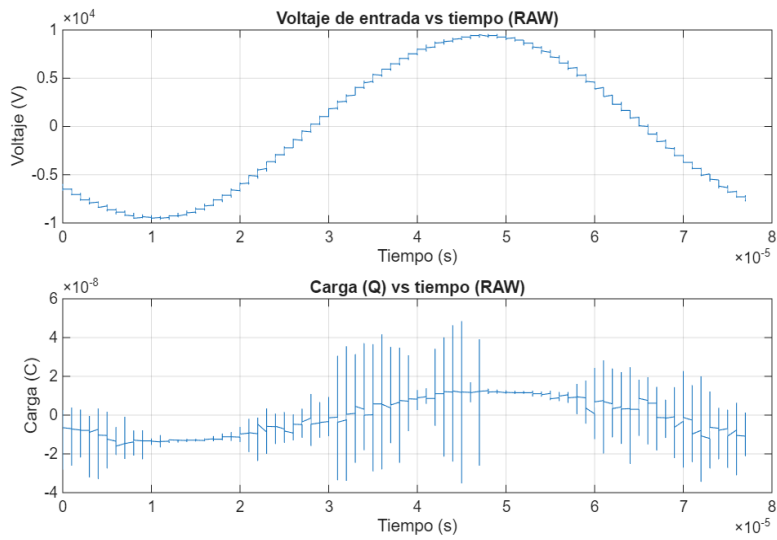


Figura 138. Voltaje de entrada y carga calculada vs tiempo

Caracterización óptica

Para cada combinación se obtuvieron espectros de emisión que se analizaron mediante código en Matlab, obteniendo las especies atómicas y moleculares presentes; en particular, las especies reactivas como OH, O, O₃, H₂O₂ y NO/NO₂, responsables de la modificación química superficial de las semillas (introducción de grupos polares y aumento de humectabilidad). Se muestran los espectros obtenidos para cada voltaje, con los diferentes capacitores y a las 3 presiones de gas He. En este análisis solo se incluye la tabla correspondiente al capacitor 1 (tabla 8), con las diferentes combinaciones de voltaje y presión, en general se adquieren los mismos datos para los diferentes capacitores, este análisis otorga la identificación de las especies, que son asociadas a cada longitud de onda y se compara con la longitud de onda teórica, valores de FWHM y $\Delta\lambda$ que sirve para la determinación de la temperatura y densidad electrónica.

Capacitor 1

Tabla 7. Espectros obtenidos correspondiente al capacitor 0.23μF

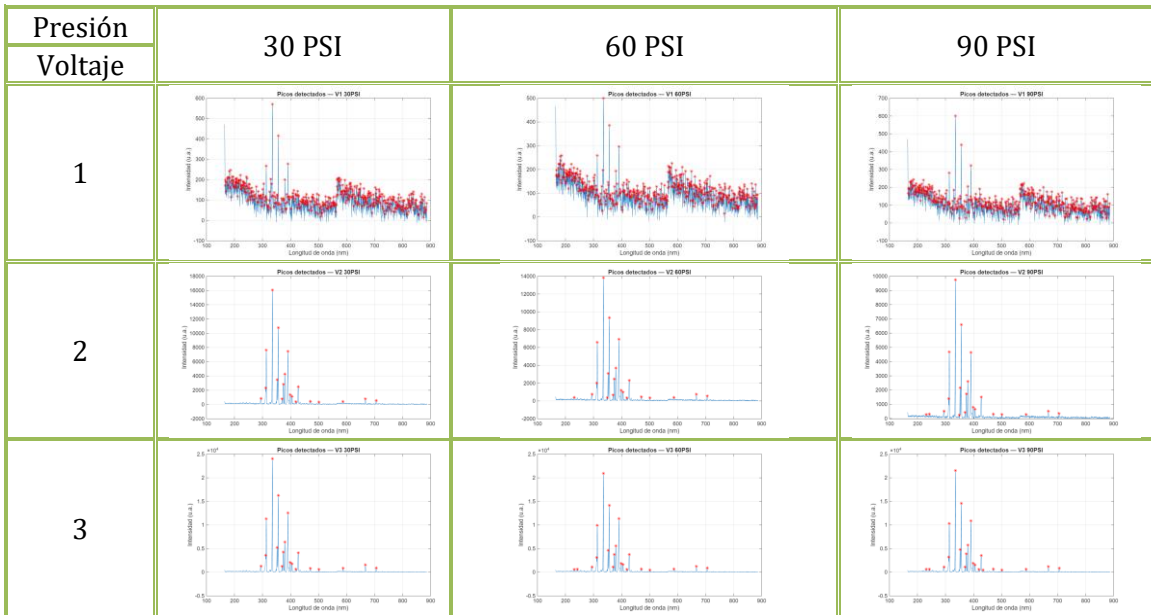


Tabla 8. Análisis espectroscópico para los diferentes voltajes y presiones correspondiente al capacitor 1

Voltaje	PSI	Longitud de onda experimental (nm)	Longitud de onda teórica (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)	FWHM (nm)	Especie
V1	30PSI	177.74	178	0.253	1.19	N
V1	30PSI	257.25	256.9	-0.358	0.33	O ₃
V1	30PSI	274.04	274.1	0.059	1.08	NO _x
V1	30PSI	284.93	285	0.068	1.51	O ₃
V1	30PSI	288.69	289	0.303	2.13	O ₃
V1	30PSI	306.75	306.4	-0.359	1.53	OH
V1	30PSI	308.95	308.9	-0.051	0.28	OH
V1	30PSI	388.64	388.86	0.215	0.21	He
V1	30PSI	409.81	410.2	0.386	0.75	H
V1	30PSI	434.48	434.8	0.318	0.98	N ₂
V1	30PSI	446.80	447.15	0.341	2.27	He
V1	30PSI	479.93	480.3	0.363	2.31	N ₂
V1	30PSI	485.77	486.1	0.323	1.24	H
V1	30PSI	501.80	501.57	-0.234	2.51	He
V1	30PSI	715.70	715.7	-0.005	3.34	O ₂
V1	30PSI	720.81	720.5	-0.301	0.21	O ₃
V1	30PSI	777.49	777.4	-0.09	2.92	O ₂
V1	30PSI	844.84	844.6	-0.245	0.85	O ₂
V1	60PSI	174.94	174.6	-0.341	0.15	N
V1	60PSI	177.74	178	0.253	1.22	N
V1	60PSI	180.31	180.4	0.084	0.26	N
V1	60PSI	225.78	226	0.22	0.35	NO _x
V1	60PSI	259.27	259.5	0.221	0.95	O ₃
V1	60PSI	274.26	274.1	-0.164	1.94	NO _x
V1	60PSI	280.71	280.5	-0.216	0.39	NO _x
V1	60PSI	282.71	282.9	0.186	0.55	OH
V1	60PSI	284.93	285	0.068	0.81	O ₃
V1	60PSI	286.0	286.1	0.06	0.38	OH
V1	60PSI	288.69	289	0.303	0.74	O ₃
V1	60PSI	306.75	306.4	-0.359	0.71	OH
V1	60PSI	308.95	308.9	-0.051	0.68	OH
V1	60PSI	337.44	337.1	-0.348	0.33	N ₂
V1	60PSI	388.64	388.86	0.215	0.24	He
V1	60PSI	410.23	410.2	-0.031	0.96	H
V1	60PSI	434.07	434	-0.07	1.12	H
V1	60PSI	462.72	463	0.273	0.33	N ₂
V1	60PSI	479.93	480.3	0.363	0.44	N ₂
V1	60PSI	485.77	486.1	0.323	1.31	H

V1	60PSI	703.47	703.2	-0.272	0.15	O ₂
V1	60PSI	715.70	715.7	-0.005	1.92	O ₂
V1	60PSI	720.80	720.5	-0.301	0.22	O ₃
V1	60PSI	739.82	740	0.176	0.35	O ₃
V1	60PSI	777.13	777.4	0.266	2.33	O ₂
V1	60PSI	777.66	777.4	-0.268	0.66	O ₂
V1	60PSI	844.84	844.6	-0.245	0.94	O ₂
V1	90PSI	177.74	178	0.253	1.18	N
V1	90PSI	180.31	180.4	0.084	0.15	N
V1	90PSI	225.78	226	0.22	0.51	NO _x
V1	90PSI	255.45	255.1	-0.359	0.88	O ₃
V1	90PSI	259.27	259.5	0.221	0.96	O ₃
V1	90PSI	274.26	274.1	-0.164	1.85	NO _x
V1	90PSI	284.93	285	0.068	1.25	O ₃
V1	90PSI	286.04	286.1	0.06	0.28	OH
V1	90PSI	288.69	289	0.303	0.87	O ₃
V1	90PSI	306.75	306.4	-0.359	1.09	OH
V1	90PSI	337.44	337.1	-0.348	0.38	N ₂
V1	90PSI	388.64	388.86	0.215	0.31	He
V1	90PSI	399.7	399.8	0.019	0.39	N ₂
V1	90PSI	410.02	410.2	0.177	0.82	H
V1	90PSI	434.07	434	-0.07	1.46	H
V1	90PSI	446.80	447.15	0.341	0.73	He
V1	90PSI	474.08	473.7	-0.381	1.04	N ₂
V1	90PSI	479.93	480.3	0.363	0.88	N ₂
V1	90PSI	485.77	486.1	0.323	0.93	H
V1	90PSI	501.80	501.57	-0.234	2.43	He
V1	90PSI	715.70	715.7	-0.005	2.62	O ₂
V1	90PSI	720.80	720.5	-0.301	0.22	O ₃
V1	90PSI	726.06	726	-0.068	1.24	O ₃
V1	90PSI	730.96	731	0.037	0.17	O ₃
V1	90PSI	777.13	777.4	0.266	1.35	O ₂
V1	90PSI	844.84	844.6	-0.245	0.71	O ₂
V2	30PSI	501.80	501.57	-0.234	1.39	He
V2	30PSI	587.32	587.56	0.231	1.65	He
V2	60PSI	501.80	501.57	-0.234	1.41	He
V2	60PSI	587.32	587.56	0.231	1.71	He
V2	90PSI	501.80	501.57	-0.234	1.54	He
V2	90PSI	587.90	587.56	-0.345	2.66	He
V3	30PSI	501.80	501.57	-0.234	1.28	He
V3	30PSI	587.71	587.56	-0.153	1.49	He
V3	60PSI	501.80	501.57	-0.234	1.38	He
V3	60PSI	587.52	587.56	0.039	1.61	He

V3	90PSI	434.07	434	-0.07	1.38	H
V3	90PSI	501.80	501.57	-0.234	1.34	He
V3	90PSI	587.71	587.56	-0.153	1.57	He

En donde $\Delta\lambda$ es una diferencia de longitudes de onda que sirve para conocer el desplazamiento de línea y el ancho espectral, se obtiene con la diferencia de la longitud de onda teórica y la experimental. En este sentido se puede tener dos casos:

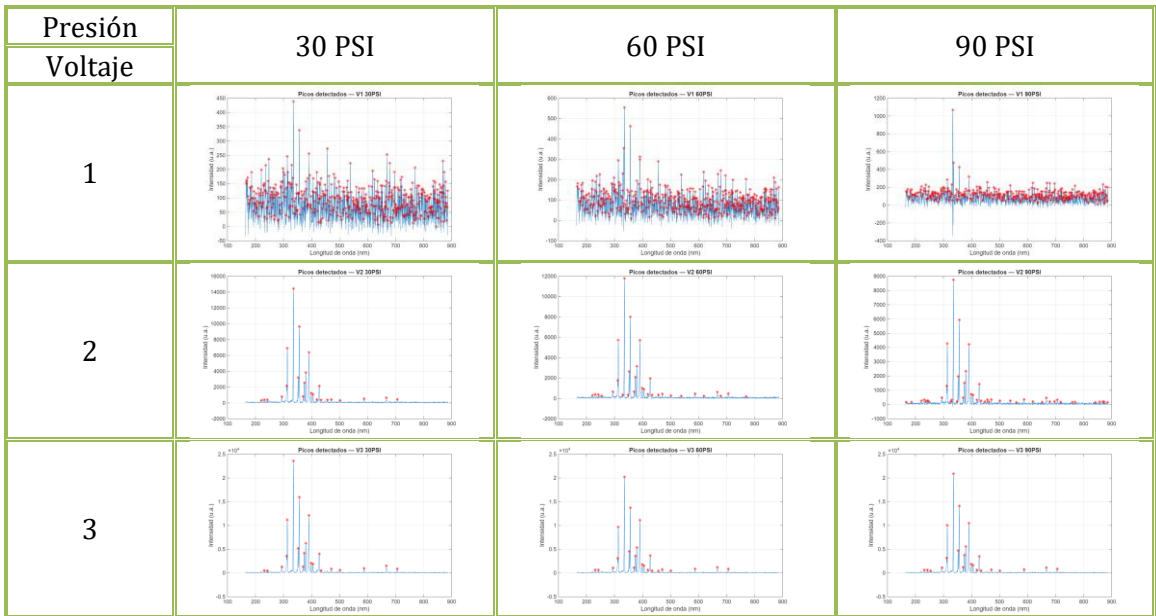
$\Delta\lambda > 0$, el pico medido es menor que la longitud de onda teórica

$\Delta\lambda < 0$, el pico medido es mayor que la longitud de onda teórica

En cuanto al FWHM que es el ancho a media altura (Full Width at Half Maximum, por sus siglas en inglés), corresponde a la anchura del pico medido a la mitad de la altura máxima. Físicamente corresponde al ensanchamiento gaussiano y lorentziano, que ayuda en el cálculo de la densidad y temperatura electrónica, una vez que se tiene este parámetro se debe ajustar a una función de Voigt y separar la componente gaussiana y lorentziana.

Capacitor 2

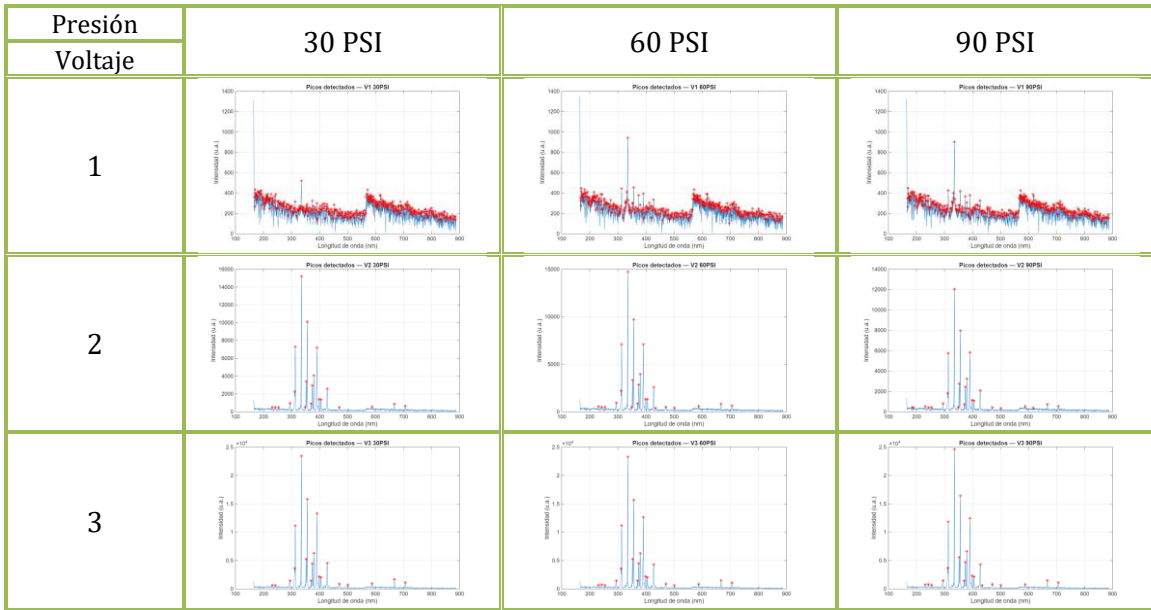
Tabla 9. Espectros obtenidos correspondiente al capacitor 0.46μF



En la tabla 9 se muestran los espectros obtenidos de las mediciones con el capacitor 2 y las diferentes configuraciones.

Capacitor 3

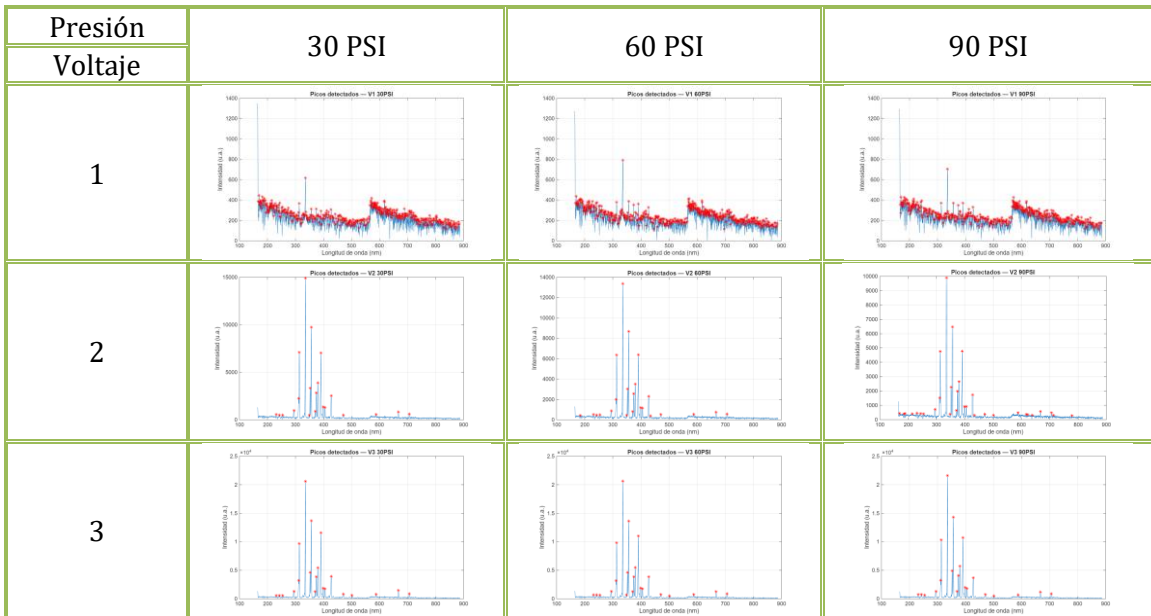
Tabla 10. Espectros obtenidos correspondiente al capacitor 0.66µF



En la tabla 10 se muestran los espectros obtenidos de las mediciones con el capacitor 3 y las diferentes configuraciones.

Capacitor 4

Tabla 11. Espectros obtenidos correspondiente al capacitor 1.0145µF



En la tabla 11 se muestran los espectros obtenidos de las mediciones con el capacitor 4 y las diferentes configuraciones.

Temperatura y densidad electrónica

Una vez analizados los espectros ópticos de emisión, se determinaron la densidad y temperatura electrónica del plasma jet, en la tabla 12 se muestran los resultados obtenidos considerando los ensanchamientos gaussianos y lorentzianos, realizando el ajuste de Voigt. Además, se realizó la comparación de la densidad considerando dos líneas del espectro, para H β , con una longitud de onda de 486.1 nm y para He con una longitud de onda de 388.6 nm. La temperatura se determinó con la línea de hidrógeno. La tabla solo muestra los datos con la siguiente configuración: capacitor de 0.46 μ F, tres voltajes y 3 presiones de He.

Tabla 12. Densidad y temperatura electrónica




Serie	n_e (H β) [m $^{-3}$]	n_e (He) [m $^{-3}$]	T_e (eV)
V1:30PSI	1.85×10^{16}	3.92×10^{15}	1.37
V1:60PSI	1.85×10^{16}	2.56×10^{15}	1.41
V1:90PSI	1.85×10^{16}	2.65×10^{11}	0.72
V2:30PSI	1.8×10^{16}	1.86×10^{15}	1.05
V2:60PSI	2.59×10^{16}	2.89×10^{15}	2.70
V2:90PSI	1.85×10^{16}	9.62×10^{15}	1.12
V3:30PSI	1.85×10^{16}	8.02×10^{10}	2.39
V3:60PSI	1.85×10^{16}	2.68×10^{14}	0.71
V3:90PSI	1.85×10^{16}	8.11×10^{14}	1.39







Fotografías Jet

Como método para evaluar la estabilidad y homogeneidad del plasma jet, en cada medición se tomaron fotografías del jet para cada configuración. Esto contribuye en la elección de la configuración óptima que se le puede asignar a diferentes aplicaciones.

Capacitor 1










Tabla 13. Fotografías del plasma jet a diferentes configuraciones, correspondiente al capacitor 0.23 μ F

Voltaje	30 PSI	60 PSI	90 PSI
1			

2			
3			










Capacitor 2

Tabla 14. Fotografías del plasma jet a diferentes configuraciones, correspondiente al capacitor 0.46 μF

Voltaje	30 PSI	60 PSI	90 PSI
1			
2			
3			










Capacitor 3

Tabla 15. Fotografías del plasma jet a diferentes configuraciones, correspondiente al capacitor 0.66 μF

Voltaje	30 PSI	60 PSI	90 PSI
1			
2			
3			

Capacitor 4

Tabla 16. Fotografías del plasma jet a diferentes configuraciones, correspondiente al capacitor 1.0145 μF

Voltaje	30 PSI	60 PSI	90 PSI
1			
2			
3			

Interacción del plasma jet con semillas de lechuga

Una vez caracterizado el dispositivo jet, se realizó el estudio de la interacción del Jet con semillas de lechuga. El análisis realizado con respecto al jet, describe el comportamiento eléctrico, obteniendo la potencia disipada, utilizando el código en Matlab se obtuvieron las gráficas correspondientes al voltaje de entrada, carga calculada mediante la medición del voltaje en el capacitor sin ajuste (figura 139) y con ajuste (figura 140), frecuencia de operación (figura 141), los diferentes ciclos de trabajo (figura 142) y la figura de Lissajous con ajuste (figura 143). La configuración con la que se trabajó corresponde a un voltaje de 6 kV, una presión de 50 PSI y las mediciones eléctricas considerando un capacitor de 0.46 μF .

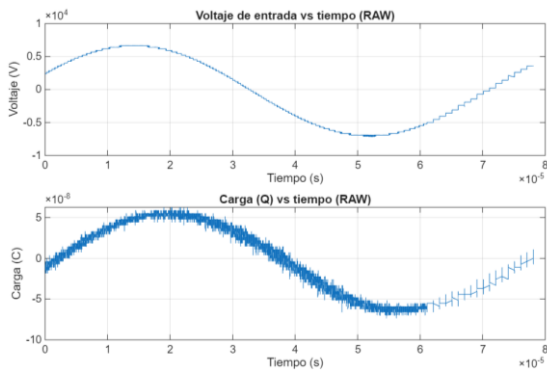


Figura 139. Voltaje de entrada y carga calculada en función del tiempo sin ajuste

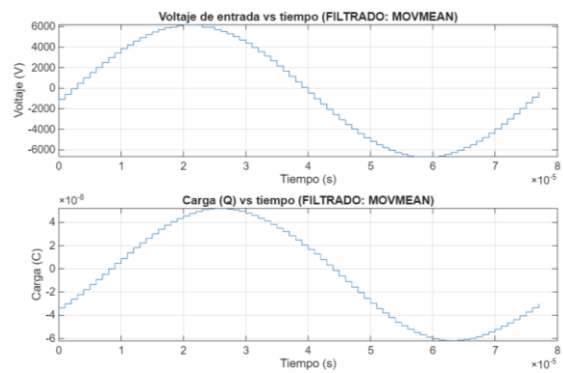


Figura 140. Voltaje de entrada y carga calculada en función del tiempo con ajuste

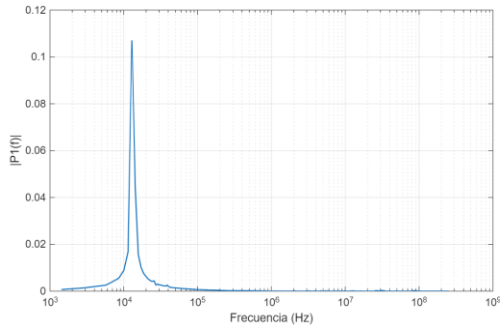


Figura 141. Frecuencia de operación

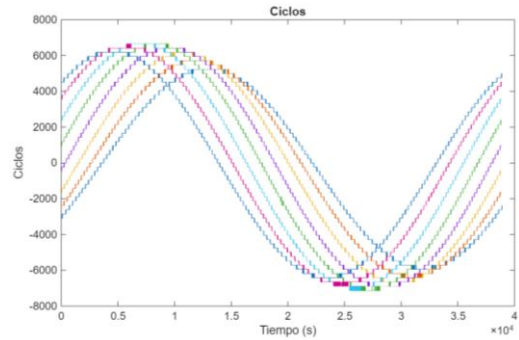


Figura 142. Ciclos de operación del plasma jet.

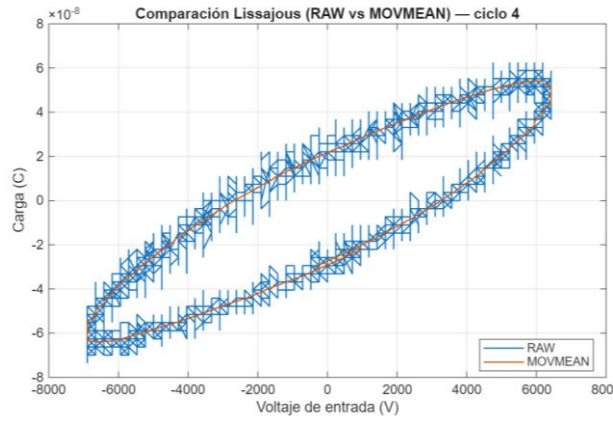


Figura 143. Diagrama carga-voltaje del plasma jet.

Tabla 17. Potencia de un jet de He

Voltaje (kV)	Potencia (W)	Frecuencia (Hz)	Flujo (PSI)
6	0.46	12857.14	50

En la tabla 17 se muestran las condiciones de trabajo en la interacción con semillas de lechuga, así como la potencia calculada mediante el diagrama carga-voltaje, obteniendo una potencia de 0.46 W.

Para estas mediciones también se analizó la figura de Lissajous, indicando las diferentes zonas de descarga (figura 144), las cuales son:

- Zona Capacitiva (sin descarga): Representada en color verde, donde el comportamiento es lineal y corresponde al sistema antes de iniciar la ionización.
- Zona de Encendido del Plasma: Marcada en color naranja, donde el plasma comienza a formarse al alcanzar el voltaje de ruptura.
- Zona de Descarga Estable: Indicada en color rojo, donde el plasma está completamente formado y la descarga es estable.

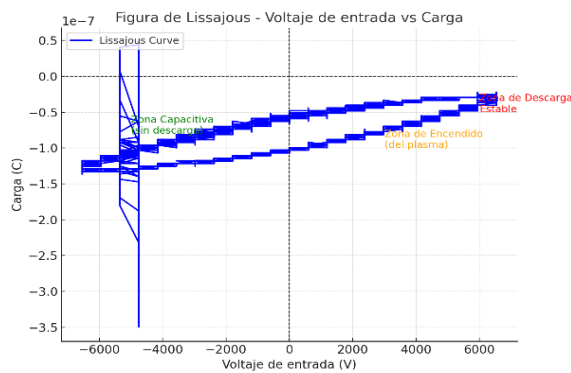


Figura 144. Identificación de las diferentes zonas de descarga de la figura de lissajous.

En el análisis espectroscópico, se realizó un filtrado para que el programa solo identifique las longitudes de onda que tengan una intensidad mayor a 500 u.a. (umbral para asegurar buena relación señal/ruido y evitar falsos picos), además, el programa asocia cada longitud a una especie que se sabe puede estar presente en el plasma. La figura 145 muestra el espectro analizado y la figura 146 las longitudes identificadas por el programa.

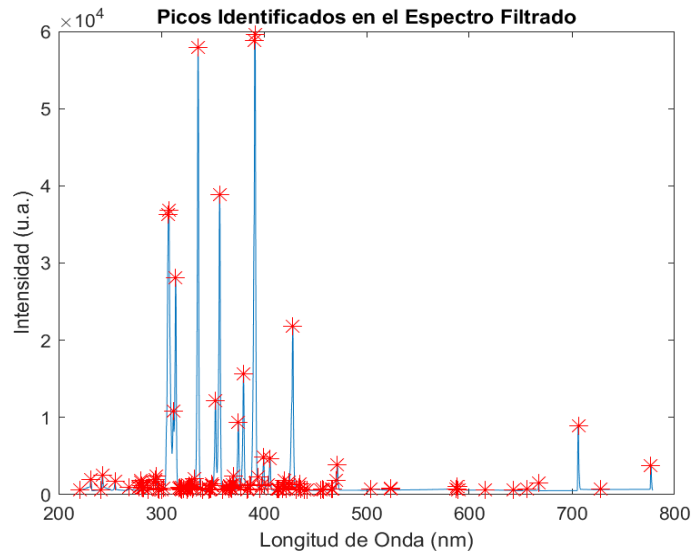


Figura 145. Identificación de las longitudes de onda.

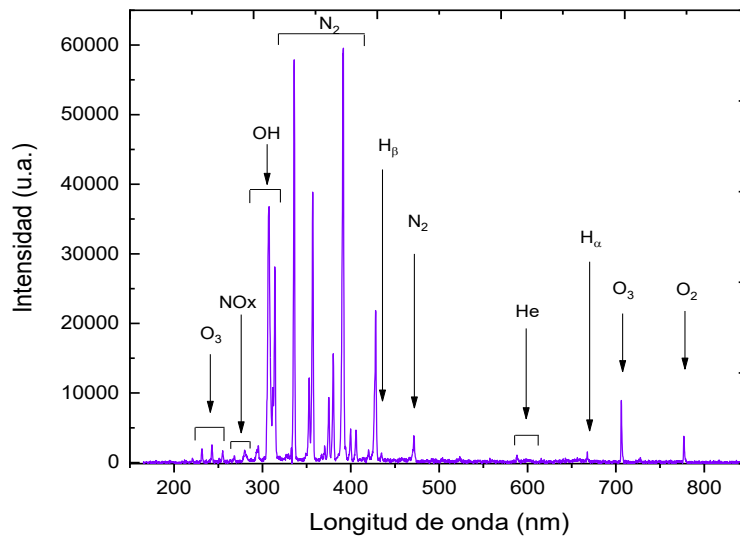


Figura 146. OES de un plasma jet de He.

La tabla 18 muestra las longitudes de onda identificadas, asociadas a cada especie, así como la longitud teórica y la transición a la que pertenece.

Tabla 18. Análisis de las especies identificadas en el plasma jet.

Longitud de onda (nm)	Especie	Sistema	Transición
255.01	O ₃	Hartley	$2s24p - 2s25s$
278.27	O ₃	Chappuis	$2s2p(3P^{\circ})3p - 2s2p(3P^{\circ})3d$
278.71	O ₃	Chappuis	$2s2p(3P^{\circ})3p - 2s2p(3P^{\circ})3d$
281.38	OH	UV	$A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi$
281.82	OH	UV	$A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi$
282.27	OH	UV	$A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi$
282.93	OH	UV	$A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi$
287.36	OH	UV	$A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi$
306.97	OH	UV	$A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi$
307.41	OH	UV	$A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi$
335.93	N ₂	C	$C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$
338.52	N ₂	C	$C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$
356.79	N ₂	C	$C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$
359.36	N ₂	C	$C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$
380.21	N ₂	C	$C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$
397.89	N ₂	C	$C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$
399.78	N ₂	C	$C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$
412.94	N ₂	C	$C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$
413.98	N ₂	C	$C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$
414.61	N ₂	C	$C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$
433.65	H _{α}	Balmer	$5 \rightarrow 2$
434.89	N ₂	C	$C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$
435.71	N ₂	C	$C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$
587.32	He	Singlete	$1s2p - 1s3d$
588.09	He	Singlete	$1s2p - 1s3d$
588.86	He	Singlete	$1s2p - 1s3d$
656.37	H _{β}	Balmer	$3 \rightarrow 2$
667.72	He	Singlete	$1s2p1s3d$
706.21	O ₃	Desconocido	$2s2p(3P^{\circ})3s - 2s2p(3P^{\circ})3p$
727.71	O ₃	Chappuis	$2s2p(1P^{\circ})3d - 2s2p(3P^{\circ})4p$
776.95	O ₂	A	$A^3\Sigma_u^+ - X^3\Sigma_g^-$

Dentro de la aplicación del plasma jet, se trataron semillas con las siguientes condiciones de trabajo: los tiempos de interacción fueron de 1, 2, 3, 4 y 5 minutos, notando que a tiempos cortos de interacción, es decir, entre 1 y 3 minutos las semillas muestran una

respuesta positiva al germinar en un menor tiempo y con un porcentaje de germinación del 66.66%, 75% y 66.66%, respectivamente en comparación con las testigo que fue del 58.33%, esto en un tiempo máximo de 2 días. El aumento en el porcentaje se debe a que las semillas están protegidas por una cubierta rica en polisacáridos, proteínas y lípidos y las especies reactivas ROS y RNS generados por el plasma interactúan con la superficie de la semilla, modificando su estructura, lo que provoca la mejora de la permeabilidad al agua. No obstante, en este trabajo no se midió directamente la permeabilidad, por lo que este mecanismo se presenta como explicación plausible consistente con la mejora observada en germinación. En las figuras 147 y 148 se muestra la germinación de semillas a diferentes tiempos de interacción y el ambiente en el que se realizaron los experimentos.



Figura 147. Semillas de lechuga en risotrones

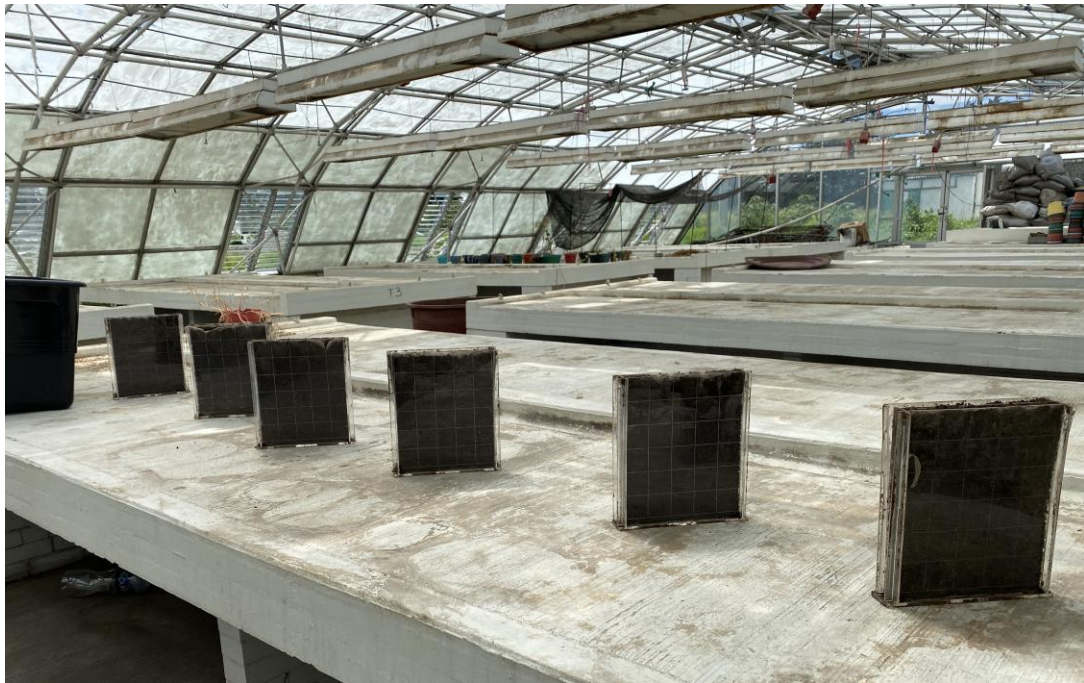


Figura 148. Ambiente de germinación

Se realizó el análisis estadístico del porcentaje de germinación por día. Obteniendo los resultados de la tabla 19 y figura 149.

Tabla 19. Porcentaje de germinación de semillas de lechuga

Tiempos de interacción	Porcentaje de germinación (%) 1er día	Porcentaje de germinación (%) 2do día
Testigo	41.66	58.33
1	50	66.66
2	75	75
3	41.66	66.66
4	33.33	58.33
5	25	33.33

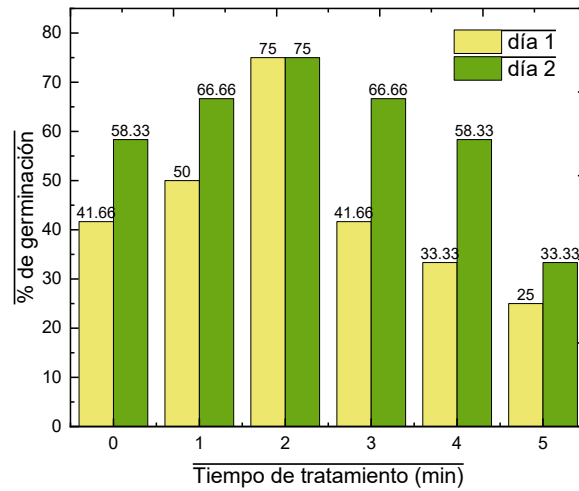


Figura 149. Porcentaje de germinación para los diferentes tiempos de interacción

Como proceso estadístico se sembraron un total de 370 semillas, divididas en 3 repeticiones para cada tiempo de interacción. En el proceso de repeticiones se sembraron las semillas en germinadores como se muestra en la figura 150.



Figura 150. Germinadores con semillas de lechuga

V. Discusión

Los resultados eléctricos, espectroscópicos y de la interacción del plasma jet con semillas de lechuga obtenidos a lo largo de este trabajo permiten generar una interpretación integrada del comportamiento del plasma jet a presión atmosférica (APPJ). El análisis ciclo a ciclo de las figuras de Lissajous muestra, de manera sistemática, la existencia de las diferentes zonas de descarga que describen a una DBD, observando la respuesta capacitiva del conjunto barreras-dieléctrico y medio y de las zonas con ruido asociadas a las microdescargas cuando la tensión excede el umbral de ruptura del gas. Esta morfología, reproducible en las distintas combinaciones de voltaje suministrado, presión de helio y capacitancia de monitoreo, confirma que el dispositivo opera en un régimen no térmico, donde la respuesta capacitiva coexiste con picos de conducción muy breves generados por microeventos de ionización. En este marco, la cuantificación de la potencia mediante la determinación del área de las figuras de Lissajous y criterio de Manley (producto de la frecuencia por el área del diagrama Q - V) se realiza de manera eficaz, mostrando que el área de las figuras aumenta con respecto al voltaje aplicado y la dispersión entre ciclos consecutivos permanece baja, aun cuando el diagrama muestre ruido.

La comparación entre los diferentes métodos de adquisición del osciloscopio (normal, pico a pico y promedio) es particularmente ilustrativa para la práctica metrológica. Aunque los valores absolutos de potencia derivados de cada modalidad no coinciden exactamente porque el cálculo de área es sensible a la forma de adquisición, el orden relativo entre condiciones se preserva y la tendencia con el voltaje se mantiene inalterada. Este resultado permite elegir una modalidad para las siguientes mediciones, en este sentido se optó por trabajar con la modalidad “normal” con ancho de banda suficiente, de igual manera se comprobaron los resultados con el análisis “pico a pico”. Esta consistencia metodológica explica por qué, incluso al incorporar ajustes de curva y filtrado suave para mitigar ruido, la diferencia entre “área sin ajuste” y “área con ajuste” fue menor que la variabilidad intrínseca entre ciclos, sin alterar conclusiones sustantivas.

En términos del circuito equivalente, capacitores monitores muy altos tienden a suavizar las esquinas del diagrama Q-V, subestimando el aporte de transitorios estrechos y, por ende, reduciendo el área. Capacitores demasiado bajos, pueden incrementar el ruido relativo y hacer más errático el cierre del diagrama por ciclo. El capacitor óptimo para el cálculo de la potencia fue el de 0.46 μF , ya que presenta estabilidad del trazo, buena repetibilidad inter-ciclos y mínima intrusión en la dinámica del sistema. Esto se observa para las 3 presiones trabajadas.

Respecto a las diferentes presiones de helio, entre 30 y 60 PSI, los diagramas muestran aperturas amplias y estables con cierres limpios por ciclo. A 90 PSI, se observa que la potencia no es constante, lo que puede reducir la densidad de electrones en la zona de medida o desplazarla espacialmente. Esto muestra que las condiciones de operación más favorables no coinciden necesariamente con el máximo de presión, sino con la estabilidad del diagrama.

El análisis de espectroscopía de emisión óptica muestra las especies presentes en el plasma como He (singlete), N₂ (sistema C - B, 2PS) y OH (A - X), O / O₂ / O₃ / NO_x, que son las esperadas en un APPJ de He con humedad ambiental no despreciable. El incremento relativo de las bandas OH y N₂ a medida que crece el voltaje se relaciona con el aumento del área en el diagrama Q - V, es decir que a mayor energía acoplada por ciclo y por unidad de tiempo, mayor producción de especies metaestables y radicales que sostienen la química oxidante en el jet. El ajuste de perfiles mediante funciones de Voigt en los que se despliega las contribuciones gaussianas (Doppler + instrumental) y lorentzianas (Stark, resonancia y van der Waals) genera las estimaciones de temperatura electrónica (T_e) en el rango de 1 - 3 eV y las variaciones de densidad electrónica (n_e) con el voltaje. Aunque la cuantificación exacta de n_e se ve afectada por la selección de líneas en entornos con contenido bajo de hidrógeno, la tendencia aumento de n_e con el voltaje y manipulación de presiones se mantuvo, corroborando que T_e >> T_g.

Al tratar semillas con el plasma jet con tiempos de interacción cortos (≈ 1 - 3 min) bajo condiciones eléctricas que mantienen T_g baja y ROS/RNS suficientes, se observó un aumento del porcentaje de germinación respecto a las semillas control. Cuando los tiempos de exposición se prolongan no se obtiene una mejoría lo que sugiere la existencia de condiciones óptimas más allá de cierto umbral, la sobreexposición local a ROS y posibles microefectos de deshidratación o estrés superficial revierten la ganancia inicial. El APPJ genera especies oxidantes capaces de modificar la superficie de la semilla.

Existen ciertas limitaciones dentro del proceso de medición y análisis de datos. Se debe considerar una calibración fiable del FWHM instrumental y asegurar una buena elección de la línea base que no distorsione el resto de las líneas para poder tener una buena estimación de T_e y n_e. Por otro lado, también se considera la elección de transiciones Hβ cuando el contenido de H lo permite y líneas no hidrogenadas en caso contrario introduce incertidumbres diferenciales. Con respecto al proceso eléctrico, el uso de capacitancias intermedias, el análisis ciclo a ciclo y la implementación de ajustes controlados redujeron significativamente estos riesgos; sin embargo, una metrología de referencia exigirá recalibraciones periódicas, cuantificación explícita de incertidumbres y contrastes ocasionales con el método de ⟨VI⟩ sincronizado.

En cuanto a la aplicación en agentes biológicos, los APPJ demuestran que es viable operar un pretratamiento localizado con baja potencia y alta efectividad química, aprovechando la selectividad de ROS/RNS sin acumulación térmica. Además, indican que la optimización no debe perseguir la potencia máxima, sino la combinación de parámetros de voltaje, frecuencia, presión, distancia boquilla - sustrato y tiempo de exposición que maximiza la disponibilidad de especies útiles a T_g baja. Por otro lado, esto sugiere un camino razonable hacia el escalamiento por medio de arreglos multijet, siempre que se conserven los mismos criterios de diagnóstico eléctrico y OES para la trazabilidad del proceso.

VI. Conclusiones

Este trabajo estableció, el proceso adecuado de diagnósticos eléctricos y espectroscópicos, de un plasma jet a presión atmosférica (APPJ) basado en descarga de barrera dieléctrica (DBD) y helio como gas de arrastre y este puede operarse de manera estable, no térmica y de baja potencia, generando un conjunto reproducible de especies reactivas (principalmente ROS y RNS) para la modificación superficial de materiales biológicos. La integración entre resultados $Q - V$ (figuras de Lissajous), OES (ajustes Voigt) y observaciones macroscópicas del jet permitió vincular condiciones eléctricas y de presión con la disponibilidad efectiva de especies oxidantes en la vecindad de la muestra, así como con indicadores biológicos tempranos (porcentaje y tiempo germinación).

Desde el punto de vista eléctrico, el uso de un capacitor monitor y el criterio de Manley mostró ser un método viable para cuantificar energía por ciclo y calcular la potencia, aún en presencia de corrientes de desplazamiento y transitorios estrechos asociados a microdescargas. La comparación de modalidades de adquisición (normal, pico a pico y promedio) confirmó que el cálculo de potencia resulta consistente ciclo a ciclo cuando se resuelve adecuadamente el diagrama $Q - V$. La potencia aumentó con el voltaje aplicado y mostró una modulación más suave con diferentes presiones de helio. Es importante considerar una capacitancia de referencia intermedia, un valor de $0.46 \mu\text{F}$ ofrece un equilibrio favorable entre estabilidad de la figura de Lissajous y mínima perturbación del sistema, algo que se reflejó en la repetibilidad de las áreas y, por tanto, de la potencia estimada.

En el diagnóstico espectroscópico, la OES mostró de forma consistente la presencia de He (líneas singlete), N_2 (sistema C–B, 2PS) y OH(A–X), junto con especies asociadas a $\text{O}/\text{O}_2/\text{O}_3/\text{NO}_x$ por mezcla con el ambiente y humedad. El ajuste de perfiles con funciones de Voigt, permitió estimar temperatura electrónica en el orden de los eV y densidad electrónica creciente con el voltaje, coherentes con un régimen no térmico ($T_e \gg T_g$). Esto sustenta que el control de la reactividad útil para superficies biológicas se obtiene manipulando amplitud, frecuencia y flujo, en lugar de incrementos indiscriminados de potencia.

La comparación entre voltajes, presiones y capacitancias de monitoreo permitió identificar posibles vías operativas que maximizan la señal de OH y N_2 en OES, que preservan la apertura estable de $Q - V$ y mantienen T_g en intervalos seguros para materia viva. En particular, una presión entre 30 - 60 PSI, con voltajes entre 6 y 12 kV, produjo descargas homogéneas, reproducibles y con química oxidante suficiente sin elevar la carga térmica. En estas configuraciones, el jet favorece imbibición y humectabilidad de cubiertas ricas en polisacáridos y lípidos, condición que se reflejó en mejoras de germinación para tiempos cortos de exposición ($\approx 1-3$ min) frente a testigos. Es relevante destacar que el máximo rendimiento biológico no coincidió con la máxima potencia absoluta, sino con un balance entre n_e , T_e , composición de especies y temperatura del gas: un resultado que lleva a la optimización multiparamétrico más que a la simple maximización del depósito energético.

Los resultados biológicos con semillas de lechuga se acoplan con esa lectura fisicoquímica: exposiciones moderadas redujeron el tiempo de germinación y aumentó el porcentaje de germinación, mientras que tratamientos prolongados tendieron a desplazar ese beneficio, probablemente por sobreexposición local a ROS y por efectos difusos de deshidratación o estrés superficial. La coincidencia entre el aumento de bandas OH y N₂ en OES y el mejor desempeño de germinación asegura, cualitativamente, la hipótesis de que el APPJ genera especies oxidantes que, al interactuar con el entorno inmediato de la semilla, favorecen desinfección y bioactivación superficial sin daño térmico bajo los parámetros de operación acotados.

No obstante, existen, limitaciones que merecen atención en la continuidad del trabajo. La estimación de T_e y n_e por OES depende de la calibración del ancho instrumental, de la selección de líneas, especialmente en condiciones con bajo contenido de H. En cuanto a la caracterización eléctrica, la potencia puede subestimarse si la cadena de medida no captura transitorios de ns y μs asociados a microdescargas. La incorporación de ajustes y la evaluación ciclo a ciclo disminuyeron estas fuentes de incertidumbre.

En general, los resultados respaldan la hipótesis planteada y cumplen el objetivo general: el proceso de diagnóstico por potencia (Lissajous) y espectroscopía (OES) permiten inferir rutas atómico - moleculares y determinar especies reactivas bajo régimen no térmico, aportando condiciones de tratamiento efectivas para agentes biológicos. La implementación de un APPJ operado con bajo impacto energético y térmico, y el carácter localizable del tratamiento, es favorable como pretratamiento en agroalimentos y biomateriales, con potencial de escalamiento mediante arreglos multijet cuando se requiera cobertura superficial mayor.

VII. Referencias

- [1] Bilea, F., et al. (2024). *Non-thermal plasma as an environmentally friendly technology for agriculture: a review and roadmap*. Critical Reviews in Plant Sciences. DOI: 10.1080/07352689.2024.2410145.
- [2] Shahabi, Z. M., et al. (2025). *Cold plasma technology as a seed pretreatment to enhance germination and salt tolerance in Prosopis koelziana*. Scientific Reports. DOI: 10.1038/s41598-025-11637-z.
- [3] Sayahi, K., et al. (2024). *Cold plasma treatment significantly enhances germination and seedling growth of vegetable crops*.
- [4] Vatchev, T., Yanashkov, I. T., Marinova, P., & Benova, E. (2025). *Pre-sowing seed treatments with cold atmospheric plasma for the control of seedling blights of winter wheat*. Processes, 13(3), 632. DOI: 10.3390/pr13030632.
- [5] Agus, R., et al. (2024). *Implementing water recirculation in a novel portable plasma-activated water reactor enhances antimicrobial effect against E. coli*. Chemical Engineering Journal, 486, 149915. DOI: 10.1016/j.cej.2024.149915.
- [6] Pareek, P., et al. (2024). *Tuning composition of plasma-activated water generated by atmospheric cold plasma for targeted applications*. Chemical Engineering Journal, 493, 152583. DOI: 10.1016/j.cej.2024.152583.
- [7] Qian, J., et al. (2024). *Plasma-activated water: perspective of the theoretical basis and application potential*. Journal of Food Engineering / Food Control (Elsevier). DOI: (tomarlo del PDF: S0924-2244(23)00397-7).
- [8] Calvo-Fernández, C., et al. (2024). *Aerosolized plasma-activated water as an alternative surface disinfectant for food and veterinary production systems*. Journal of Food Engineering (en prensa). DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2024.104.
- [9] Pleslić, S., et al. (2025). *Monitoring and diagnostics of non-thermal plasmas in the food sector using optical emission spectroscopy*. Applied Sciences, 15(15), 8325. DOI: 10.3390/app15158325.
- [10] Giannakaris, N., et al. (2023). *Optical emission spectroscopy of an industrial thermal atmospheric-pressure plasma jet: parametric study of electron temperature*. Spectrochimica Acta Part B.
- [11] OES diagnostics of atmospheric-pressure argon plasma (2024). *Applied Physics Letters*, 124(23), 234103.

- [12] Zhu, X., et al. (2025). *A collisional-radiative model for atmospheric-pressure low-temperature air discharges*. Plasma Science and Technology.
- [13] Capelli, F., et al. (2024). *Recommendations and guidelines for the description of cold atmospheric plasma processes*. Journal of Electrostatics / Plasma Medicine (Elsevier). DOI: 10.1016/j.jes.2024.102571.
- [14] Orłowski, J., et al. (2025). *Application of cold atmospheric pressure plasma jet (APPJ) to plant seeds: multivariate optimisation of working parameters*. Applied Sciences, 15(3), 1255. DOI: 10.3390/app15031255.
- [15] Lieberman, M. A., & Lichtenberg, A. J. (2005). Principles of Plasma Discharges and Materials Processing (2nd ed.). Wiley.
- [16] Chen, F. F. (2016). Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion (3rd ed.). Springer.
- [17] Fridman, A. (2008). Plasma Chemistry. Cambridge University Press.
- [18] Loureiro, J. (2016). Fundamentals of Debye shielding in low-temperature plasmas. (capítulo / notas técnicas usadas en física de plasmas).
- [19] Bruggeman, P. J., & Kushner, M. J. (2016). Fundamentals of cold atmospheric pressure plasmas: sources, plasma–surface interactions and applications. Journal of Physics D: Applied Physics, 49(43), 430301.
- [20] Thiry, C. (2016). Non-thermal plasmas: principles and selected applications at atmospheric pressure. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 36(4), 999–1030.
- [21] Fantz, U. (2006). Basics of plasma spectroscopy. Plasma Sources Science and Technology, 15(4), S137–S147.
- [22] Brandenburg, R. (2022). Dielectric barrier discharges and atmospheric pressure plasma jets: progress, challenges and emerging applications. Journal of Physics D: Applied Physics, 55(37), 373001.
- [23] Reuter, S., Sousa, J. S., & Brandenburg, R. (2023). Stable operation regimes of DBD-based atmospheric-pressure plasma sources. Plasma Sources Science and Technology, 32(4), 043002.
- [24] Wagner, H.-E., et al. (2003). The barrier discharge: basic properties and applications to surface treatment. Vacuum, 71(3), 417–436.
- [25] Jánský, J., et al. (2024). Accurate power determination of atmospheric-pressure DBDs using Lissajous figures at high repetition rates. Plasma Sources Science and Technology, 33(2), 025012.

- [26] Xiong, Q., et al. (2012). Influence of gas composition and electrode configuration on the characteristics of atmospheric-pressure plasma jets. *Journal of Applied Physics*, 111(12), 123302. DOI: 10.1063/1.4729472.
- [27] Sarani, A., & Zúñiga, C. (2024). Role of humidity and target proximity on OH generation in atmospheric-pressure plasma jets. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 44(1), 55–74.
- [28] Zhu, X. (2016). Optical emission spectroscopy and electrical characterization of atmospheric DBDs.
- [29] Lamichhane, P. (2022). Plasma-activated water: physicochemical properties and antimicrobial mechanisms.
- [30] Lari, A., et al. (2019). Voigt-profile-based analysis of OES for atmospheric pressure plasmas.
- [31] Griem, H. R. (1997). *Principles of Plasma Spectroscopy*. Cambridge University Press.
- [32] Parker, T. (2016). Manley-plot analysis and power determination in atmospheric DBDs.
- [33] Nikiforov, A., et al. (2015). Generation of reactive oxygen and nitrogen species in He APPJ.
- [34] Yuji, M. (2021). Reaction pathways for OH and O₃ formation in atmospheric-pressure plasma jets interacting with humid air.
- [35] Bharti, R., Kaushik, N., Parvez, S., et al. (2016). Cold atmospheric plasma and plasma-activated media for anti-microbial and wound-healing applications: mechanisms and translational outlook. *Clinical Plasma Medicine*, 4–5, 1–8. DOI: 10.1016/j.cpme.2016.05.001.
- [36] Zhang, Q., Liang, Y., Feng, H., Ma, R., Tian, Y., Zhang, J., & Fang, J. (2016). A study of oxidative stress induced by non-thermal plasma-activated water for bacterial inactivation. *APL Bioengineering*, 1(2), 026103. DOI: 10.1063/1.4977775.
- [37] Gründner, S., Brandenburg, R., & Stieber, M. (2016). Atmospheric pressure plasma jets for surface activation and adhesion improvement in industrial processing lines. *Plasma Processes and Polymers*, 13(10), 985–997. DOI: 10.1002/ppap.201600123.
- [38] Jaspers, R. (2014). Plasma Spectroscopy. *Science and Technology of Nuclear Fusion*, 404-413.

[38] Lommatzsch, U., & Pasedag, D. (2007). Atmospheric pressure plasma jet treatment of polypropylene and metal foils for improved adhesion. *Surface and Coatings Technology*, 201(6), 9279–9282. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2007.04.062.

[39] Spange, S., & Reich, S. (2017). Atmospheric-pressure CVD and plasma-assisted CVD for functional polymer coatings. *Progress in Organic Coatings*, 112, 93–110. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2017.06.003.

VIII. Anexos

Se presentan los códigos en Matlab utilizados para el análisis espectroscópico y eléctrico.

Calculo de Potencia

Algoritmo **Potencia_Lissajous_Filtrada**

Entrada: archivo_datos, params_filtro, factores_escalas, N_ciclos

Salida: tabla_resultados, figuras

```
datos ← leer(archivo_datos)
(t, vin, vcap) ← limpiar_columnas(datos)

Fs ← estimar_Fs(t)
(f0, Ns) ← detectar_fundamental_por_FFT(vcap, Fs)

(vin_raw, vcap_raw) ← (vin, vcap)
(vinflt, vcapflt) ← aplicar_filtro_opcional(vin, vcap, params_filtro, f0,
Fs)

(Vin_RAW, Q_RAW) ← escalar(vin_raw, vcap_raw, factores_escalas)
(Vin_FLT, Q_FLT) ← escalar(vinflt, vcapflt, factores_escalas)

para ciclo = 1 hasta N_ciclos hacer
    (VinR, QR) ← segmentar(Vin_RAW, Q_RAW, ciclo, Ns)
    (VinF, QF) ← segmentar(Vin_FLT, Q_FLT, ciclo, Ns)

    A_raw ← area_poligonal(VinR, QR)
    P_raw ← f0 * A_raw

    Aflt ← area_poligonal(VinF, QF)
    Pflt ← f0 * Aflt

    guardar_en_tabla(ciclo, A_raw, P_raw, Aflt, Pflt, f0)
    exportar_figuras_ciclo(VinR, QR, VinF, QF)
fin para

exportar_tabla_resultados()
exportar_espectro_FFT()
reportar_resumen(f0, Ns, params_filtro)
Fin Algoritmo
```

Identificación de OES

Algoritmo **OES_Multitab_Consolidado**

Entrada: archivo_OES, ref_lines{ λ , especie, sistema, transición},
params_det (prom_rel, dist_nm, tol_nm),
params_proc (baseline, suavizado), TopN

Salida: tablas_por_condición, AllResults.xlsx, Resumen.xlsx,
Consolidado_por_Especie.xlsx, figuras_QC, comparativas

hojas \leftarrow [V1, V2, V3]

presiones \leftarrow [30PSI, 60PSI, 90PSI]

AllResults \leftarrow \emptyset ; Resumen \leftarrow \emptyset

para cada h en hojas:

T \leftarrow leer_hoja(archivo_OES, h)

(λ , cols_PSI) \leftarrow identificar_columnas(T)

para cada p en presiones:

Iraw \leftarrow T[columna(p)]

baseline \leftarrow estimar_baseline(Iraw, params_proc)

Icorr \leftarrow max(Iraw - baseline, 0)

Isuav \leftarrow suavizar(Icorr, params_proc)

picos \leftarrow findpeaks(Isuav, prom_rel, dist_nm/ $\Delta\lambda$)

para cada pico en picos:

λ_{med} \leftarrow λ [pos(pico)]

(λ_{ref} , meta) \leftarrow asociar_mas_cercana(λ_{med} , ref_lines, tol_nm)

FWHM \leftarrow estimar_FWHM(pico, $\Delta\lambda$)

registrar_en_tabla_condición(λ_{med} , λ_{ref} , $\Delta\lambda_{ref}$, altura, FWHM, meta)

fin para

exportar_QC(λ , Iraw, baseline, Isuav, picos, h, p)

acumular_en(AllResults, tabla_condición, etiqueta={h,p})

actualizar(Resumen, métricas_condición)

fin para

fin para

exportar(AllResults, "AllResults_OES.xlsx")

exportar(Resumen, "Resumen_OES.xlsx")

para cada condición c en condiciones(AllResults):

top_rows \leftarrow topN_por_especie(AllResults[c], TopN)

escribir_hoja("Consolidado_por_Especie.xlsx", c, top_rows)

fin para

especies_top \leftarrow seleccionar_especies_relevantes(AllResults)

para cada p en presiones:

M \leftarrow matriz_intensidad_por_especie(AllResults, hojas, p, especies_top)

graficar_barras_apiladas(M, hojas, especies_top, p)

fin para

reportar_resumen_final()

Fin Algoritmo

Determinación de la temperatura y densidad electrónica

Algoritmo `Parametros_APPJ_desde_OES`

Entrada: `archivo_OES`, `lineDB_usuario`, `NIST?`, `Stark?`, `rot_list?`

Salida: `tablas_por_condición` (Voigt y resumen), `figuras`

```
para cada hoja  $V \in \{V1, V2, V3\}$ :
  leer tabla(V); detectar columna  $\lambda$ 
  para cada flujo  $F \in \{30PSI, 60PSI, 90PSI\}$ :
     $I \leftarrow$  preprocesar(intensidad: suavizado + baseline + normalización)
    fitTab  $\leftarrow \emptyset$ 
    para cada línea (especie,  $\lambda_0$ ) en lineDB_usuario:
      seg  $\leftarrow$  datos en  $[\lambda_0 \pm 3 \text{ nm}]$ ; si señal  $\geq$  umbral: ajustar Voigt(seg)
      extraer  $\{\mu, FWHM_G, FWHM_L, \text{área}, R^2, SNR\}$ ; guardar en fitTab y
graficar
    fin

     $T_{vib} \leftarrow$  razón de bandas  $N_2(2PS)$  por integración  $\pm 3 \text{ nm}$ 
     $T_{rot} \leftarrow$  (opcional) ajuste sobre rotacional con rot_list

     $n_e \leftarrow$  Stark( $H\beta$  preferente;  $H\alpha$  alternativo) usando FWHM_L + coeficientes (CSV
o fallback)

     $T_{e\_Boltz} \leftarrow$  Boltzmann(He I preferente; H I alternativo) con NIST
     $T_{e\_Saha} \leftarrow$  Saha-Boltzmann(si hay ionización &  $n_e$ )

    exportar(fitTab, "ajustes_voigt_lineas.csv" en carpeta  $V\_F$ )
    exportar(resumen $\{T_{vib}, T_{rot}, n_e, T_{e\_Boltz}, T_{e\_Saha}, \text{fuentes}\}$ ,
"resumen_Te_ne.csv" en carpeta  $V\_F$ )
  fin
fin
Fin Algoritmo
```