



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO  
CAMPUS LEÓN

---

---

DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍAS

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA  
FUENTE DE IONES POR MEDIO DE UN  
REACTOR DE PLASMA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS APLICADAS

P R E S E N T A:

ARÓN HERNÁNDEZ TRINIDAD

DIRECTORES:

DR. GEORFREY HUMBERTO ISRAEL MAURY  
CUNA

DRA. MARÍA CONCEPCIÓN GARCÍA  
CASTAÑEDA

LEÓN, GUANAJUATO, 2020

*Dedicado a mis padres y abuela. A los que están y ya no.*

# Agradecimientos

Agradezco a los asesores de esta tesis, la Dra. María Concepción García Castañeda y al Dr. Georfrey Humberto Israel Maury Cuna, por el apoyo tan fundamental durante la maestría, por sus consejos y sus dedicaciones para que este proyecto fuese posible. Asimismo, a la División de Ciencias e Ingenierías, Campus León de la Universidad de Guanajuato, cuyas convocatorias de apoyo a posgrado fueron esenciales para el enriquecimiento del presente trabajo. Cabe mencionar, que agradezco de forma igual y sustancial, el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACyT, con la beca otorgada durante la maestría con número CVU: 893699.

Agradezco a mis amigos que siempre han estado conmigo en los momentos difíciles y a mi familia en general, sin ellos, esta travesía no hubiese sido realidad. A mis compañeros de maestría y a los que he conocido a lo largo de mi estancia en León, y del proyecto de tesis. En particular, a la Dra. María Guadalupe Neira Velázquez por formar parte del Comité de Seguimiento Académico y por su calurosa bienvenida en el Departamento de Polímeros en CIQA, Saltillo, Coahuila, muchas gracias.

También, al financiamiento otorgado por parte de la Secretaría de Innovación, Ciencia y Educación Superior (SICES) para el fortalecimiento del programa de la Maestría en Ciencias Aplicadas a través del convenio: PNPC/SICES/CONV/190/2019UG. De igual manera, al proyecto No. 295720 de la Convocatoria 2018 de Fortalecimiento a la Infraestructura Científica y Tecnológica del CONACyT.

# Resumen

Las fuentes de iones tienen muchas aplicaciones en la industria, medicina y ciencia, particularmente en los aceleradores de partículas; por tal motivo, el desarrollo de estos dispositivos es de gran interés. En esta tesis se propone el diseño y construcción de una fuente de iones, a partir de un reactor de plasma. Dicho prototipo consta de dos cámaras, la primera es donde se producen los iones, dando lugar a la generación del plasma. Posteriormente, se tiene la segunda cámara que alberga los electrodos, uno de sus electrodos se conecta a una fuente de alto voltaje, que produce un campo electroestático que acelera los iones que se encuentran dentro del plasma. Al final de las cámaras, se encuentra la placa detectora, que mide la cantidad de iones que chocan contra ella, a partir de la corriente eléctrica generada por el haz de iones. Para la generación del plasma, se ioniza el gas dentro de la cámara de producción de iones mediante un campo de radiofrecuencia que excita a los electrones del gas, y éstos al tener la suficiente energía rompen los enlaces de las moléculas.

En esta tesis, se estudió el proceso de elaboración del dispositivo. Se consideró el diseño mecánico, la simulación electromagnética y, finalmente, la construcción. Se reportan cada uno de estos procesos de forma detallada.

# Abstract

Ion sources have many applications in industry, medicine and science, particularly in particle accelerators; for this reason, the development of these devices is of great interest. This thesis proposes the design and construction of an ion source by means of a plasma reactor. This prototype consists of two chambers, the first one is where the ions are produced, resulting in the generation of the plasma. Subsequently, we have the second chamber where are the electrodes, one of its electrodes is connected to a high voltage source, which produces an electrostatic field that accelerates the ions within the plasma. At the end of the chambers, a detector plate is located, this plate measures the number of ions that collide with it, from the electrical current it detects. For the plasma generation, the gas is ionized inside the ion production chamber through a radio-frequency field that excites the electrons of the gas, and these having enough energy break the bonds of the molecules.

In this thesis, the manufacturing process of the device was studied. Mechanical design, electromagnetic simulation and, finally, construction were considered. Each of these processes is reported in detail.

# Índice general

Agradecimientos	II
Resumen	III
Abstract	IV
Índice de figuras	VII
Prólogo	XV
Objetivos, hipótesis y justificación	XVII
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Fuente de partículas . . . . .	2
1.1.1. Fuente de iones . . . . .	3
1.2. Plasma . . . . .	3
1.2.1. Generación del plasma . . . . .	4
<b>2. Marco teórico</b>	<b>6</b>
2.1. Historia del plasma . . . . .	6
2.2. Tipos de plasma . . . . .	7
2.3. Parámetros del plasma . . . . .	9
2.4. Energía de ionización . . . . .	12
2.5. Fuentes de iones a partir del plasma . . . . .	13
2.5.1. Adaptación del límite de plasma . . . . .	14

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	VI
2.5.2. Reactor de plasma tipo capacitivo e inductivo . . . . .	15
2.5.3. Reactor tipo capacitivo . . . . .	16
2.5.4. Reactor tipo inductivo: Campo magnético generado por una bobina helicoidal . . . . .	17
2.5.5. Ley de Child-Langmuir . . . . .	21
<b>3. Metodología</b>	<b>23</b>
3.1. Diseño mecánico de la fuente de iones . . . . .	23
3.1.1. Planos de la primera cámara: Reactor de plasma . . . . .	24
3.1.2. Planos de la segunda cámara: Extracción de iones . . . . .	27
3.1.3. Ensamble de las cámaras . . . . .	28
3.2. Simulación física de la fuente de iones . . . . .	29
3.2.1. Reactor de plasma . . . . .	30
3.2.2. Sistema de extracción . . . . .	31
3.3. Construcción de la fuente de iones . . . . .	31
3.3.1. Tapas de aluminio estándar 6061 . . . . .	32
3.3.2. Vidrio refractario de borosilicato . . . . .	34
3.3.3. Conexiones para el ensamblaje . . . . .	34
3.3.4. Formación de la bobina . . . . .	35
<b>4. Resultados</b>	<b>37</b>
4.1. Diseño mecánico . . . . .	37
4.2. Simulación física . . . . .	42
4.2.1. Reactor tipo inductivo . . . . .	45
4.2.2. Simulación de la segunda cámara . . . . .	47
4.3. Construcción del dispositivo . . . . .	50
4.3.1. Ensamble, pruebas y caracterización de la fuente de iones . . .	50
<b>5. Conclusión</b>	<b>58</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>60</b>

# Índice de figuras

1.1. Esquema simplificado de una fuente de partículas. . . . .	3
1.2. Reactor de plasma. Esquema de la fuente de iones realizada en este proyecto, formada por dos cámaras. La primera, es el el reactor de plasma, mecanismo generador de iones, seguida por el sistema de extracción. .	4
1.3. Producción del plasma por medio de la técnica directa, que consiste en un arco de descarga o un cátodo dentro de la cámara, encargado de generar cargas libres para ionizar el gas. Se muestra las diferentes partes que componen la fuente de iones, usando esta técnica. . . . .	5
2.1. Cambio de fase de plasma frío (NTP) a caliente. Donde $T_e$ es la temperatura de los electrones y $T_g$ la temperatura de las especies (átomos, iones, moléculas y partículas neutras) [33]. . . . .	8
2.2. Energía de ionización respecto al número atómico de algunos elementos químicos (Cortesía: Creative Commons Atribución 3.0 Unported [46]).	13
2.3. Diferentes fuentes de iones a partir del plasma. Se enlista, en la parte derecha, las características principales del dispositivo. La generación del plasma, así como el sistema de extracción cambian en cada fuente. Esto es debido a su aplicación. . . . .	14
2.4. Distancias entre los límites del electrodo y el plasma, donde $r$ es el radio de abertura de la salida de los iones y $d$ es el espaciamiento entre la abertura y el electrodo de extracción. (a) Muestra la divergencia del haz debido al espaciamiento entre ambos, mientras que en (b) se observa la convergencia del haz, ya que la distancia entre ellas es mínima.	15

2.5. Bosquejo de conexión electrónica básica de los reactores conectado a un generador de radiofrecuencia (RF). (a) Este reactor está compuesto por dos electrodos a una mínima distancia entre ellos, y básicamente dos orificios; entrada del gas y bomba de vacío. (b) Lo integra una cámara de vacío, dos orificios como en el caso (a), y una bobina de cobre enrollada a la cámara. . . . . 16

2.6. Esquema geométrico de la bobina helicoidal. Cada uno de los parámetros representados, se refieren a:  $\vec{r}'$  el vector de trayectoria,  $a$  el radio de la hélice,  $I$  la corriente que circula en la bobina,  $h$  el espaciamiento entre cada vuelta,  $L_z$  la longitud de la bobina helicoidal,  $\theta'$  ángulo relacionado con el vector de trayectoria y  $\vec{r}$  el vector de observación. . 18

2.7. Trayectoria del vector posición generada con el software Mathematica. Se ilustra la comparación con la Figura 2.6. Los parámetros usados fueron:  $a = 26.3\text{ mm}$ ,  $h = 23\text{ mm}$  y  $L_z = 116\text{ mm}$ , esto fue debido a las medidas disponibles para la construcción del dispositivo. . . . . 19

2.8. Bosquejo simplificado de dos electrodos separados a una distancia  $x$ , en este tipo de sistema rige la ley de Child-Langmuir. . . . . 21

3.1. (a) Dimensiones de la brida NW10, ésta sirvió como conexión entre el sistema de vacío y el reactor de plasma. (b) Tapa principal que va ensamblada con la brida, además contiene una circunferencia de 50 mm de diámetro y una profundidad de 5 mm, diseñada para el ensamble con la cámara de vidrio. . . . . 24

3.2. Tapa secundaria del reactor de plasma, alrededor de ella, pasantes para pernos  $M16$  que sujetan esta cámara con el sistema de extracción. . . 25

3.3. (a) Diseño de la bobina con geometría helicoidal, este tipo de material y calibre soporta hasta 30 A de intensidad de corriente, (b) Vidrio borosilicatado resistente, durable con resistencia térmica y química altas. 26

3.4. Esquema del empaque de sellado con las dimensiones correspondientes para el dispositivo. . . . . 26

3.5. Placa detectora que contiene una circunferencia concéntrica de 5 mm de profundidad, diseñada para insertar la cámara. En éste, chocan los iones, creando así una intensidad de corriente que puede detectarse con un amperímetro convencional que registre escalas pequeñas de amperes. 27

3.6. Tubo de vidrio KIMAX®<sup>®</sup>, de longitud 134 mm, con esta medida se observó claramente el haz de iones y se minimizó la dispersión del mismo. . . . . 28

3.7. Elementos de conexión entre ambas cámaras. . . . . 29

3.8. Bosquejo simple de producción y aceleración de iones. Idea general de simulación en el software COMSOL, de ambas cámaras, a partir de un gas dado. . . . . 30

3.9. (a) Reactor constituido de dos placas de aluminio estándar 6061 conectadas a la fuente RF: 0613 GTC de 13.56 MHz, paralelas entre sí y distanciadas por una cámara de vidrio borosilicatado. Como estudio preliminar del plasma, se usó aire como gas para su ionización. (b) Cámara de vacío del mismo material que el reactor CCP, y mismo gas, más sin embargo, la fuente RF se conectaba a la bobina de cobre esmaltado de calibre 10 y con 5 vueltas. . . . . 30

3.10. Cámara de extracción formado por dos placas de aluminio estándar 6061 y un vidrio de borosilicato. En la placa de extracción, se encuentra un orificio concéntrico de 6 mm de diámetro; salida de los iones. Se conectó a una fuente de alto voltaje a 1 kV y la placa detectora se conectó a un sensor de corriente para obtener la relación entre el voltaje aplicado y la corriente detectada. . . . . 31

3.11. (a) Primer paso de la elaboración, (b) seguido del corte individual, sin embargo, se lleva al primer paso nuevamente con la cara expuesta debido al corte, para obtener una llanura definida en ella. . . . . 32

3.12. Maquinado de los elementos de aluminio, con las dimensiones expuestas en los planos de diseño. . . . . 33

3.13. (a) Perforación pasante, encargados de sujetar por medio de pernos aislantes la fuente de iones, en el centro se encuentra la salida de éstos, (b) la brida fue adquirida por un distribuidor especializado, se incorporó a la tapa mediante una cinta de teflón que mantuvo el sellado. . . . .	33
3.14. Extremos esmerilados, del contorno de la superficie cortada. Después del proceso de lijado, se logró la finura con agua y B-99. Finalmente, se lavó las cámaras con acetona para disolver manchas, aceite, polvo y esmalte. . . . .	34
3.15. El diseño del tornillo MX1, se exportó al programa Ultimaker Cura 4.0, encargada de vincular el objeto con su impresión. Se imprimió en un PLA Blanco con 95 % de relleno y una resolución de 0.1 mm a 210° C en la boquilla extrusora. . . . .	35
3.16. Empaques de unión entre el reactor de plasma y el sistema de extracción: silicón, PVC, caucho, nitrilo y PLA (de izquierda a derecha). El dispositivo se ensambló y se probó el mejor material que mantenía el vacío esperado, según los resultados de las simulaciones. . . . .	35
3.17. (a) Se construyó un cilindro hueco, de 5 mm de grueso, como soporte, donde se encontraba incrustado la forma de la hélice, que formaría la bobina. (b) Resultado final, después de ser sometido al torno. . . . .	36
4.1. Reactor de plasma tipo inductivo, en la parte izquierda se encuentra la brida, cuya función es suministrar el sistema de vacío a la cámara. En la parte derecha, se encuentra la tapa de unión que contiene 6 orificios de fijación a la cámara extractor. . . . .	38
4.2. Densidad de flujo magnético a través de la longitud $L_z$ de la bobina a corriente constante $I_0 = 7.5$ A, esta longitud coincide con la longitud de la cámara de vacío. El eje horizontal $Z(m)$ representa la dirección donde se encuentra ésta, desde el punto $(0, 0)$ hasta $(0, 116, 0)$ , en el eje vertical se muestra la densidad de flujo magnético en Tesla. . . . .	39
4.3. Densidad de flujo magnético a través de la longitud $L_z$ a $t = 1$ s. . . . .	39

4.4. Cámara de extracción y detección de iones. La entrada de los iones se encuentra en la placa izquierda, que se conecta a una fuente de alto voltaje, los iones generan una trayectoria que choca con la placa detectora (derecha), ésta a su vez, está conectada a un sensor de intensidad de corriente. Este sistema es la consecuencia de la Ley de Child-Langmuir, que relaciona voltaje aplicado y corriente detectada. . . . . 41

4.5. Diseño mecánico de la fuente de iones, a la izquierda la cámara de generación del plasma y a la derecha la cámara de extracción. En la unión se colocaron los O rings y el empaque entre el reactor y el extractor. 41

4.6. Reactor capacitivo a diferentes potencias usando el generador de RF. 43

4.7. (a) Si se aumenta el voltaje a 500 V, se aumenta la densidad de iones en la placa, más no se genera el plasma en toda la cámara. (b) Se observa que a partir de 550 V, el plasma se empieza a expandir y se desprende de la placa, aumentando la densidad de iones por metro cúbico. (c) En 700 V, se aumenta la distribución y se observa un plasma cuasiestable. (d) Finalmente, a 900 V se produce un plasma estable que a medida que pase el tiempo, va expandiéndose en todo el volumen de la cámara, sin embargo, al aumentar el voltaje, se obtienen mejores resultados. . . 44

4.8. Simulación de la bobina conectada al generador RF de 13.56 MHz. (a) En la barra de colores de la derecha, se muestra los valores de la densidad de flujo magnético en Tesla, desde el valor mínimo (azul) hasta el máximo (rojo oscuro), se observa que solamente existe densidad de flujo dentro de la bobina, y alrededor de ésta, siendo los valores máximos en el contorno de cada vuelta. (b) Las flechas del campo cambian de sentido a medida que pasa el tiempo, debido a la naturaleza de la corriente variable, también los valores de la densidad de flujo magnético varían. . . . . 45

4.9. Reactor inductivo a diferentes potencias usando el generador de RF.  
 (a) Inicialmente, la producción de iones se genera fácilmente a 1 W de potencia, sin embargo, la densidad de iones por metros cúbicos es pequeña cerca de las paredes (azul) y máxima en el centro (rojo oscuro), pero estable y el plasma cubre gran parte de la cámara. (b) A 50 W el plasma se expande en casi toda el volumen, aumenta la densidad de iones del gas y los valores máximos se encuentra en el centro. (c) La distribución de los iones es mayor y se observa que en las paredes la densidad aumentó, el plasma es muy estable a esta potencia. (d) Finalmente, a la máxima potencia de la fuente, la densidad aumentó a una escala de  $10^{19}$  de iones por metros cúbicos y cubre prácticamente toda la cámara. . . . . 46

4.10. Gráfica de relación entre el voltaje aplicado y la cantidad de corriente. En el eje horizontal se encuentran los valores del voltaje (V) y en la vertical la cantidad de corriente (A). A medida que aumenta el voltaje, aumenta la intensidad de corriente, se espera un rango de  $\mu\text{A}$  a 1 kV. 47

4.11. Trayectoria de los iones a través de la cámara de extracción. La etiqueta de colores a la derecha, representa el desplazamiento radial mínimo (azul) y máximo (rojo oscuro) del haz. Cuando salen los iones del plasma, conservan el radio de abertura de entrada: 3 mm, pero a medida que avanzan las partículas en la cámara de vacío, se van separando de este radio inicial, y se aumentan las distancias con respecto a éste, que da lugar a la dispersión del haz, los valores máximos se localizan al llegar a la placa detectora. . . . . 48

4.12. Trayectoria de los iones en  $z$  en tres cortes diferentes. Los puntos de color rojo, representan a los iones en  $z = 0$ , saliendo del plasma y entrando a la cámara de vacío. Mientras que los puntos de color azul representan la trayectoria de las partículas en  $z = L/2$ , a mitad de la cámara. Por último, los puntos de color negro, en  $z = L$ , cuando llegan a la placa detectora. . . . . 49

4.13. (a) Fuente de iones compuesta por un reactor de plasma y un sistema de extracción simplificado. Se insertó en cada placa una conexión hembra, para conectar de forma segura los equipos con el dispositivo. (b) Conexión bomba-fuente. Existe un conjunto elaborado de bridas, trampa de vacío, entre otros, que brindan seguridad a todo el sistema. 51

4.14. Circuitos eléctricos de la fuente de iones. (a) La bobina se conecta a la fuente RF, que produce el campo magnético, ambos comparten la misma tierra, para cerrar el circuito. (b) La placa acelerador se conecta a una fuente de alto voltaje, mientras que la placa detectora está vinculada a un amperímetro que registra la cantidad de corriente. Todas comparten la misma tierra. . . . . 51

4.15. Conexión de los equipos respecto a la fuente de iones. . . . . 52

4.16. Reactor de plasma a distintas potencias. (a) Con esta potencia se genera el plasma, pero existe poca producción de iones y el plasma se localiza en una cierta región de la cámara. (b) Al aumentar la potencia, como en este caso, el plasma cubre completamente el volumen del reactor, y existe una cantidad mayor de iones, esto se ilustra principalmente por el espectro que emite y la intensidad. . . . . 52

4.17. Fuente de iones conectada a los equipos correspondientes para generar y acelerar las partículas, con la finalidad de detectarlos en el amperímetro. 53

4.18. Solenoide incrustado en el sistema de extracción con la finalidad de converger el haz y disminuir la dispersión del mismo. . . . . 54

4.19. Sistema general de la fuente de iones. . . . . 55

4.20. Haz de iones. (a) La dispersión se notó claramente, por lo que no se pudo obtener registros de las cantidades de corriente que llegaban a la placa detectora. (b) Se mostró una mejoría, el haz se definió y pudo converger en el sistema de detección. . . . . 55

4.21. Trayectoria de los iones en el sistema de extracción y detección, se observó que al pasar las partículas por el solenoide, éstas se enfocan y forman un haz bien definido, cuya intensidad de corriente se registró en el amperímetro. . . . . 56

# Prólogo

En los últimos años, el avance del desarrollo de los aceleradores de partículas en México, ha sido paulatino; sin embargo, ha existido un aumento de interés por esta línea de investigación, que día a día, muestra avances sobresalientes en tres principales campos: industria, medicina y ciencia. El aporte de la presente tesis, va dirigido hacia el desarrollo tecnológico de aceleradores de partículas en México, en particular las fuentes de partículas como es el caso de la de iones. Dentro de esta área de investigación, existen diferentes componentes tales como los magnetos, las cavidades de radiofrecuencias, los controles de seguridad, las fuentes de partículas, entre otros, que hacen posible el funcionamiento de los aceleradores. Este trabajo de investigación se llevó a cabo con la finalidad de mostrar los fundamentos físicos, experimentales y de ingeniería detrás de una fuente de iones, con el objetivo de obtener un prototipo reproducible en laboratorios y talleres de investigación con materiales y equipos adecuados para su funcionamiento. La relación que existe entre diseños asistidos por computadora y las simulaciones con la construcción de algún dispositivo, es fundamental para el proceso de su desarrollo, ayuda a mejorar el rendimiento del equipo, además de aportar datos esenciales sobre su mecanismo. Con estos pasos previos, la elaboración es eficiente y las pruebas a las que debe someterse el dispositivo para su verificación y comparación con los resultados previstos es más eficaz.

Finalmente, a partir de los resultados, se enlistan los beneficios y las desventajas del prototipo construido. La importancia del trabajo radica en el uso de un reactor de plasma como generador de iones para formar un haz de este tipo de partículas.

El plasma es un estado de agregación de la materia, como los ya conocidos: sólido, líquido y gas. Existe un interés amplio sobre el plasma debido a sus propiedades electromagnéticas que lo hacen fácil de manipular y utilizar para diferentes aplicaciones. El plasma es muy similar al estado gaseoso, la diferencia es que no posee un equilibrio electromagnético, es decir, las partículas que lo componen, están cargadas eléctricamente. Se encuentra constituido por iones y electrones. Por tal motivo, un reactor de plasma es una herramienta ideal para producir iones y con un sistema de extracción adecuado se puede obtener un haz de iones. En la presente investigación, se simplificó este sistema y se logró construir una fuente de iones de manera exitosa.

# Objetivos, hipótesis y justificación

## Objetivos de investigación

1. **General:** Diseñar y construir una fuente de iones por medio de un reactor de plasma

### Particulares

- 1) Diseño asistido por computadora del reactor de plasma, teniendo en cuenta la cámara de ionización mediante un reactor de tipo inductivo y la simplificación del sistema de extracción de los iones.
- 2) Realizar simulaciones de las cámaras que constituyen la fuente de iones. Como estudio preliminar, se estudia el aire como gas.
- 3) Construir la fuente de iones a partir de las especificaciones que se obtendrán de las simulaciones, el diseño y los planos de construcción, y con los materiales disponibles para su armado.

## Hipótesis

Es posible obtener una fuente de iones mediante un reactor de plasma, usando un gas en particular, con cierta energía, variando la potencia y el campo de radiofrecuencia (RF), para que así se puedan crear iones, y sean acelerados mediante un campo eléctrico; formando un haz de iones. Teniendo en cuenta el vacío producido en el dispositivo con materiales de aluminio, vidrio y nitrilo.

## **Justificación**

El área de aceleradores de partículas en México, representa un área de oportunidad para desarrollar ciencia en nuestro país. Uno de los retos de la comunidad científica y tecnológica mexicana es acelerar la construcción de dichos dispositivos. Sus aplicaciones son amplias; desde la medicina hasta la industria. Por tal motivo es importante crear, patentar y realizar avances en este campo, ya que la mayor parte de los aceleradores que se encuentran en el país son importados. El principal desafío de México para impulsar el desarrollo en esta línea de investigación, es la formación de capital humano con el conocimiento, habilidades y experiencia para fabricar estos dispositivos, así como inversión privada y pública.

# Capítulo 1

## Introducción

Cerca del año 1900, el científico británico Joseph John Thomson realizó una serie de experimentos en tubos de rayos catódicos, que le llevó al descubrimiento de una nueva partícula atómica: el electrón [1]. En la historia de la ciencia, los tubos de rayos catódicos usados por Thomson, eran los primeros aceleradores de partículas. Estos dispositivos hacen uso de campos electromagnéticos para acelerar partículas cargadas a diferentes velocidades. Sin embargo, no fue hasta cerca del año 1930, que el mundo científico retomó el tema de los aceleradores. A partir de esos años, ha evolucionado el diseño, la energía y las aplicaciones de estas máquinas [2]. Hoy en día, existen aceleradores de partículas de gran tamaño que se han convertido en importantes herramientas para el avance de la física, ya que posibilitan conocer en detalle, la estructura de las partículas fundamentales [3,4].

Desde entonces, los aceleradores de partículas se han desarrollado con ayuda de avances como los materiales superconductores, los sistemas de vacío, supercomputadoras, por mencionar algunos. Asimismo, la aplicación se ha extendido a diferentes áreas, tal es el caso de la industria y medicina [4]. Estos dispositivos se pueden clasificar, generalmente, en dos tipos: lineales y circulares. Cuando el haz de partículas atraviesa el acelerador una vez, se le conoce como lineal. Por otra parte cuando el haz atraviesa el acelerador un número indefinido de veces, se le conoce como circular.

## 1.1. Fuente de partículas

Existen muchos componentes que conforman a los aceleradores, particularmente, las fuentes de partículas. Son de suma importancia, ya que, sin éstas, no se producirían las cargas eléctricas que conforman el haz a acelerar. Existe una relación entre la máquina y el tipo de partícula, suele conocerse como la rigidez, definida en la Ecuación (1.1), que muestra el efecto del campo magnético (diseño del acelerador) y las características del haz producido por la fuente [5]. Donde  $B$  es la densidad de flujo magnético,  $\rho$  es el radio de curvatura de la trayectoria de la partícula,  $p$  es su momento lineal y  $q$  su carga. La dependencia de la fuente sobre el tipo de acelerador, recae sobre el tipo de partícula que se usa. A medida que aumenta el momento lineal ( $p$ ) de una partícula, en la Ecuación (1.1), aumenta directamente proporcional la densidad de flujo magnético ( $B$ ) y con ello la energía cinética, ( $E_k = \frac{p^2}{2m}$ ), es por ello que se requiere de sistemas más sofisticados para controlar dicha energía [6]. Cuando se produce una fuente de electrones, usualmente son acelerados por un campo electrostático como en el acelerador Van de Graaff o Cockcroft-Walton [7]. Ahora bien, si se tiene un haz de iones o protones, los cuales son más pesados que el electrón debido a su masa; por lo tanto, se requiere de un sistema de extracción y aceleración adecuados. Lo mismo pasa para una fuente de antiprotones donde se necesita de un sistema más elaborado como el Tevatrón en el Fermilab o como el LEAR (Low Energy Antiproton Ring, Anillo de Antiprotones de Baja Energía) en el CERN [8].

$$B\rho = \frac{p}{q} \tag{1.1}$$

Una fuente de partículas consiste en una cámara que produzca las partículas y acelere el haz, seguido de un sistema de extracción. Diversos dispositivos emplean este método de producción y extracción, para producir un haz, los más conocidos son el magnetrón, el plasmatrón, el cañón de electrones, la máquina Penning, entre otros. En la Figura 1.1, se muestra del lado izquierdo la cámara donde se producen las partículas cargadas eléctricamente, conectada a un sistema de extracción de dichas partículas [9].

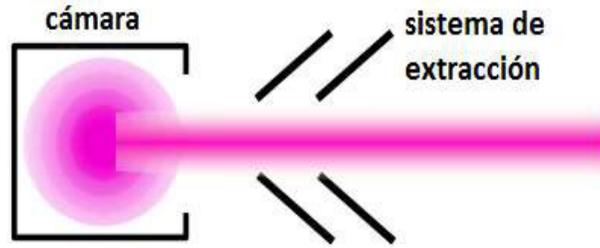


Figura 1.1: Esquema simplificado de una fuente de partículas.

### 1.1.1. Fuente de iones

Como se mencionó anteriormente, la fuente provee las partículas que serán aceleradas. Estas partículas pueden ser electrones, protones, positrones o iones. La forma de producirlas puede variar en función del tipo de acelerador y su aplicación [10, 11]. El haz de iones se puede confinar mediante un campo magnético y con ello volverse un haz definido [12].

Para generar estas partículas, se recurre a los métodos principales para producir el plasma; por medio de una descarga eléctrica, mediante el calentamiento de un gas o usando un campo electromagnético que lo ionice [13, 14]. Siendo esta última la configuración más común, compuesta de tres secciones: cámara de producción de plasma, un conjunto de rejillas cargadas eléctricamente y un neutralizador. La primera sección produce los iones, seguida del sistema que acelera éstos a altas velocidades y los confina en un haz, finalmente, el neutralizador, que es básicamente una fuente de electrones. Éste compensa la carga de los iones en el haz para reducir su divergencia, por medio de la interacción coulombiana entre ellos.

## 1.2. Plasma

El plasma, el estado de agregación más abundante en el universo, se encuentra formado principalmente de electrones, iones y especies neutras; es muy similar al estado gaseoso, pero la diferencia recae en que determinada proporción de sus partículas están cargadas eléctricamente, y por lo tanto no es eléctricamente neutro [15]. Es por ello que se considera un buen conductor eléctrico y responde muy bien a las

interacciones con campos electromagnéticos [16]. En cierta forma, el plasma se puede considerar como un gas parcialmente ionizado. Se requieren ciertas características para generar el plasma, las tres principales son el vacío, el gas a ionizar y un campo electromagnético [17]. Las formas comunes de plasma se clasifican de tres maneras, las producidas artificialmente, las terrestres y las espaciales. Los rayos durante una tormenta o las auroras polares son consideradas plasmas terrestres, mientras que el sol y las estrellas son plasmas espaciales [18]. Los televisores o los tubos fluorescentes son algunos ejemplos de plasmas que se producen de forma artificial.

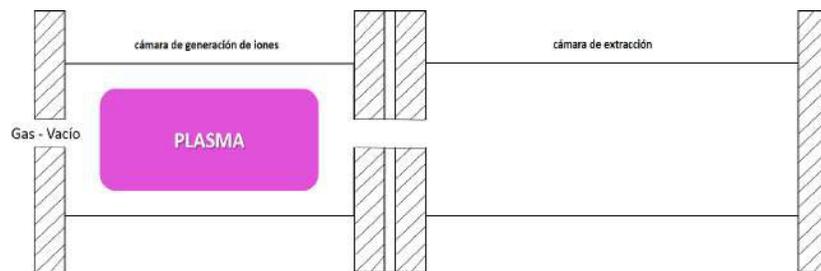


Figura 1.2: Reactor de plasma. Esquema de la fuente de iones realizada en este proyecto, formada por dos cámaras. La primera, es el reactor de plasma, mecanismo generador de iones, seguida por el sistema de extracción.

En la Figura 1.2, se muestra un sistema simple de producción de plasma, seguido de la cámara de extracción. Esta idea básica, es la que se utilizó en esta tesis. El plasma se generó a baja presión ( $\sim \times 10^{-1}$  mbar) en el reactor por medio de un campo magnético, el gas que se ionizó fue el aire, como parte de los estudios preliminares.

### 1.2.1. Generación del plasma

La generación de cargas libres en el plasma se da, generalmente, por las siguientes maneras [19]:

- La emisión de forma directa, es dada por un arco de descarga dentro de la cámara donde se producirá el plasma. También, mediante un cátodo emisor de cargas dentro de la región de producción, ya sea que emita cargas de forma termoiónica (calentando el cátodo) o por campo (conectado a una fuente de corriente) [20]. En la Figura 1.3, se muestra el plasma producido por la emisión

directa de electrones libres, que se basa en conectar la cámara a una fuente, mediante electrodos o bobina, encargada de ionizar el gas.

- La emisión de forma indirecta se da por medio de un campo electromagnético que se encuentra fuera de la cámara, y excita al gas para que éste pueda emitir electrones libres y se ionice [21]. En el presente proyecto se utilizó la técnica de generación electrónica indirecta, por medio de una fuente de radiofrecuencia que está conectada a una bobina de cobre, la cual produce el campo magnético suficiente para ionizar el gas.

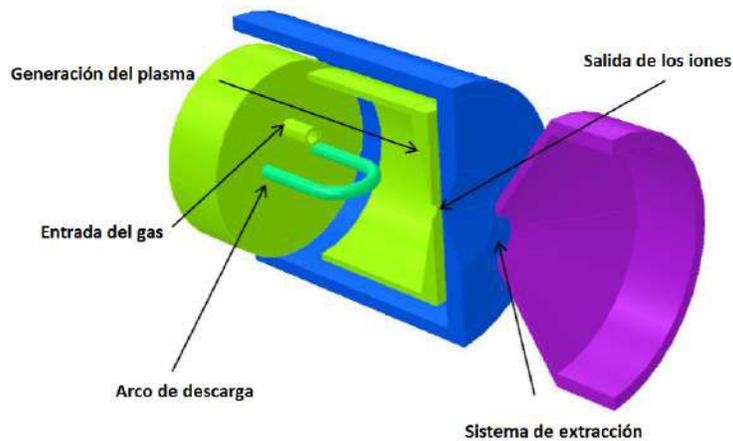


Figura 1.3: Producción del plasma por medio de la técnica directa, que consiste en un arco de descarga o un cátodo dentro de la cámara, encargado de generar cargas libres para ionizar el gas. Se muestra las diferentes partes que componen la fuente de iones, usando esta técnica.

# Capítulo 2

## Marco teórico

El plasma se considera un conductor eléctrico por las propiedades que se mencionaron en el Capítulo 1. Cuando se somete a un campo magnético, el plasma responde fuertemente a su influencia, generando estructuras como filamentos, rayos, entre otras [22]. El plasma está constituido por fotones (con espectro de emisión determinado por el tipo de gas), átomos, moléculas neutras, iones (partículas cargadas eléctricamente), electrones y radicales (portadores de carga eléctrica, extremadamente inestable y de vida muy corta) [23]. Bajo condiciones apropiadas se puede generar artificialmente, como se realizó en esta tesis.

### 2.1. Historia del plasma

Los primeros estudios del plasma datan del siglo XIX, cuando Humphry Davy desarrolló la descarga de arco eléctrico en estado estable usando corriente directa [24]. Por su parte, Michael Faraday, en 1830 construyó un tubo de descarga eléctrica de alto voltaje con corriente directa y dio inicio al estudio del material, obtenido después de dicha descarga [25]. En 1879, William Crookes identificó esta sustancia y la definió como el cuarto estado de la materia [26]. Sin embargo, el término plasma fue introducido por el físico inglés Irving Langmuir en 1928, quien lo describió como un gas ionizado [27].

Una de las primeras aplicaciones del plasma fue en 1960, cuando se llevó a cabo

la polimerización de estireno a partir de monómeros introducidos en una cámara o reactor donde se generaba el plasma [28]. En el siglo XX, el plasma se empleó en la fusión nuclear con fines militares, sin embargo, en la actualidad también puede ser utilizado para generar energía eléctrica, donde los átomos de hidrógeno son ionizados para generar el plasma, y éste es sometido a fuertes campos magnéticos al punto de que forme helio, de este modo se liberan grandes cantidades de energía; otras aplicaciones son el recubrimiento de materiales mediante polimerización por plasma, la propulsión por plasma, y las fuentes de iones, por mencionar algunas [29]. En el caso de los aceleradores de partículas, las fuentes de iones requieren una región de producción y de extracción de iones. La ingeniería que se requiere, dependerá de diferentes parámetros, como la energía máxima del haz, el tipo de ion, la intensidad del campo magnético, por citar algunos ejemplos [30]. En síntesis, el plasma consiste en la producción de iones y electrones, a través de la ionización de un gas, que puede ser generado en condiciones apropiadas, y que con un sistema de extracción adecuado, se pueden acelerar iones para formar un haz.

## 2.2. Tipos de plasma

Las clasificaciones de los plasmas son diversas; sin embargo, de forma general, se dividen en calientes y fríos, en función del grado de ionización o densidad del plasma, la cual puede variar las propiedades del mismo. El plasma que se produce en la industria, es generalmente frío, ya que la densidad de ionización es baja, es decir, la temperatura de sus partículas pesadas (con mayor masa como helio, carbono u otros iones; a diferencia de los protones y electrones) se encuentra entre 25°C a 100°C. El plasma caliente se caracteriza por su elevada temperatura, a cientos de grados centígrados [31, 32]. En la Figura 2.1, se muestra un diagrama de fase donde se observan las regiones de plasma frío y caliente.

Los plasmas que se trabajan en condiciones de baja presión ( $\geq \times 10^0$  bar) mediante equipos como el generador de radiofrecuencia (RF) y microondas, no siempre son accesibles, debido al costo operativo de los equipos de vacío y generadores de campos

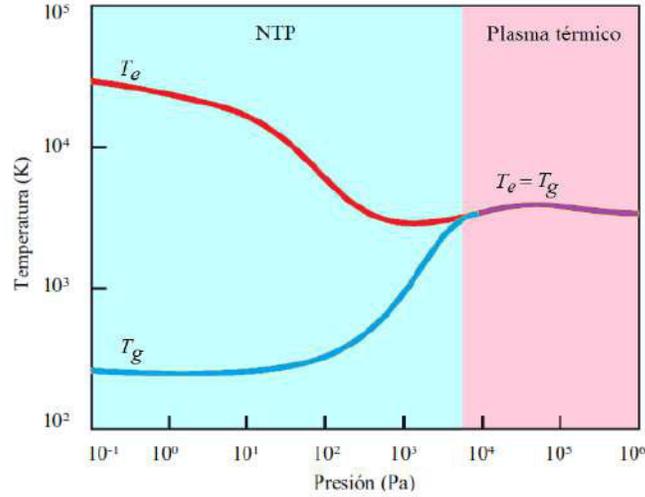


Figura 2.1: Cambio de fase de plasma frío (NTP) a caliente. Donde  $T_e$  es la temperatura de los electrones y  $T_g$  la temperatura de las especies (átomos, iones, moléculas y partículas neutras) [33].

electromagnéticos intensos [33]. En esta tesis, se produjo el plasma frío como medio generador de iones, ya que se contaban con los equipos necesarios para su producción. El plasma caliente se emplea a presión atmosférica, o mayor, con la técnica de descarga corona y de barrera que se aplican a una escala industrial con potencias de  $10^6$  W para soldaduras, grabados u otros [34].

Para la generación del plasma frío, la distribución de energía dió inicio a la inoización por medio de los electrones ( $e^-$ ), éstos son mucho más ligeros que cualquier partícula dentro del plasma [35]. Durante la ionización, existen dos tipos de colisiones, elásticas e inelásticas. En el caso de las colisiones elásticas no cambia la estructura electrónica de las especies neutras, pero sí su energía cinética:



Donde  $e_r^-$  es un electrón que posee una velocidad mayor que cualquier especie en el gas denotado por  $X_l$  pero que al chocarse elásticamente, el electrón cede energía a la especie, por lo que su velocidad disminuye  $e_l^-$  respecto a la  $X_r$  que la aumenta. Mientras que, las colisiones inelásticas modifican la estructura electrónica de las especies neutras y las convierten en especies reactivas:



Donde  $X$  representa a cualquier especie en el gas,  $X^*$  una partícula excitada, y  $X^+$  a un ion positivo. Entonces, la transferencia de energía se realiza por colisiones elásticas, entretanto, las colisiones inelásticas inducen una serie de reacciones químicas que se ilustra en la Tabla 2.1, donde  $X^-$  representa a un ion negativo. Estas reacciones fueron importantes, al momento de realizar la simulaciones necesarias para producir el plasma, ya que existe una alta producción simultánea de portadores de carga y especies altamente reactivas [36].

Tabla 2.1: Reacciones en la región activa del plasma frío.

Ionización	$X + e^- \rightarrow X^+ + 2e^-$
Captura de electrones	$X + e^- \rightarrow X^-$
Captura disociativa de electrones	$X + e^- \rightarrow X^- + X$
Disociación	$X + e^- \rightarrow X + X + e^-$
Excitación	$X + e^- \rightarrow X^* + e^-$
Ionización disociativa	$X + e^- \rightarrow X^+ + X + 2e^-$
Liberación de electrones	$X^- + e^- \rightarrow X + 2e^-$
Recombinación	$X^+ + e^- \rightarrow X$

### 2.3. Parámetros del plasma

Existen parámetros importantes para comprender la naturaleza del plasma y definir su comportamiento siendo los principales la presión, la temperatura electrónica y la densidad electrónica. Al estudiar la temperatura del plasma, se aborda desde un punto de vista microscópico, ya que las partículas de una determinada especie localizadas en un punto dado, no tienen igual velocidad, además muestran una distribución descrita por la distribución Maxwell-Boltzmann [37]. A mayor temperatura  $T$ , mayor la dispersión de velocidades, por lo tanto mayor energía cinética, esta relación se describe por:

$$\langle E \rangle = \frac{3}{2} \kappa_B T \quad (2.4)$$

Donde  $\kappa_B$  es la constante de Boltzmann, con un valor de  $8.6173 \times 10^{-5} eV/K$ . Es común expresar la temperatura de las especies en  $eV$ . Se trabajó a energías bajas, en la producción de los iones, por lo tanto, el dispositivo no tiene efectos relativistas. Entonces, la velocidad promedio ( $v_m$ ) de las partículas es dada como:

$$v_m = \sqrt{\frac{2\langle E \rangle}{m}} = \sqrt{\frac{3\kappa_B T}{m}} \quad (2.5)$$

Donde  $m$  es la masa de las partículas. La ecuación del gas ideal, relaciona la densidad  $n$ , con la presión  $P$ , de la forma siguiente:

$$P = n\kappa_B T \quad (2.6)$$

$$n = \frac{P}{\kappa_B T} \quad (2.7)$$

La trayectoria libre media ( $\lambda_m$ ) es un parámetro importante para el estudio del plasma y se define como la distancia media recorrida antes de poder interactuar con otra partícula del sistema [38]:

$$\lambda_m = \frac{1}{\sigma n} = \frac{\kappa_B T}{\sqrt{2}\pi d^2 P} \quad (2.8)$$

Donde  $\sigma$  es la sección eficaz de interacción y se aproxima mediante el cuadrado del diámetro de la partícula  $d^2$  [39]. El número de colisiones por unidad de tiempo es la definición de la frecuencia de colisión ( $\nu_c$ ):

$$\nu_c = \frac{v_m}{\lambda_m} = \sqrt{\frac{6}{m\kappa_B T}} \pi d^2 P \quad (2.9)$$

El comportamiento del gas puede ser descrito por la teoría cinética de los gases, como se muestra en la Ecuación (2.4). El plasma, además, tiene especies con carga, debido a la ionización parcial del gas. Las densidades de iones y electrones, se re-

presentan por  $n_i$  y  $n_e$ , respectivamente. Este estado de la materia, es conocido por ser neutro o cuasi-neutro, ya que contiene igual número de cargas positivas como de negativas (existen variaciones locales). La variación espacial de las cargas, lleva al concepto de la longitud de Debye [40]. Esta longitud representa la distancia sobre la cual puede ocurrir una separación significativa de carga y proporciona una medida de las longitudes típicas en un plasma. Considerando tanto iones negativos como electrones, se expresa de la forma siguiente [41]:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \kappa_B}{e^2 \left( \frac{n_e}{T_e} + \sum \frac{Z_j^2 n_j}{T_i} \right)}} \quad (2.10)$$

Donde  $\lambda_D$  es la longitud de Debye,  $\epsilon_0$  la permitividad eléctrica del vacío,  $e$  la carga del electrón,  $T_e$  y  $T_i$  las temperaturas de los electrones e iones negativos, respectivamente.  $n_e$  es la densidad de electrones y  $n_j$  la densidad de iones, con carga negativa  $Z_j$ . La ecuación (2.10) se puede reescribir en forma simplificada, si no se consideran los iones negativos como:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \kappa_B T_e}{e^2 n_e}} \quad (2.11)$$

Otro parámetro importante en el plasma es la frecuencia  $\omega_p$ , que relaciona al tiempo característico de una oscilación natural en él, cuando se somete a una perturbación [42]. Este estado de agregación de la materia, se encuentra en equilibrio y sin densidades de carga, si se efectúa un pequeño desplazamiento de los electrones en una dirección, éstos sentirán la atracción de los iones en dirección opuesta. Entonces, los electrones se moverán hacia los iones y comenzarán a oscilar en torno a la posición original de equilibrio, este es el principio de la frecuencia del plasma. Viene dada para los electrones  $\omega_{p,e}$  como [43]:

$$\omega_{p,e} = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}} \quad (2.12)$$

Donde  $m_e$  es la masa de electrones. El producto de la longitud de Debye y la frecuencia del plasma está relacionado con la velocidad media promedio ( $v_m$ ) de los

electrones, como se muestra en la siguiente expresión:

$$(\lambda_D)(\omega_{p,e}) = \sqrt{\frac{4\pi\epsilon_0\kappa_B T_e}{m_e}} = v_m \sqrt{\frac{4\pi\epsilon_0}{3}} \quad (2.13)$$

El grado de ionización del plasma es la relación de la cantidad de partículas con carga contra la cantidad total de partículas presentes y precisa el comportamiento de este. Depende principalmente de la temperatura y es posible deducirlo en una primera aproximación a partir de la ecuación de Saha-Langmuir [44], válida para un plasma en equilibrio térmico (contiene iones que se han ionizado una sola vez).  $U_i$  es el primer potencial de ionización promedio y  $\hbar$  es la constante de Planck ( $6.63 \times 10^{-34}$  Js).

$$\frac{n_e^2}{n - n_e} = 2 \left( \frac{2\pi m_e \kappa_B T_e}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{U_i}{\kappa_B T_e}} \quad (2.14)$$

## 2.4. Energía de ionización

Un gas puede ser ionizado por diversas formas, como se ha mencionado. Sin embargo, la ionización del gas dependerá del tipo de átomo. Cada átomo en la tabla periódica está definido por la energía de ionización. Ésta se define como la energía necesaria para separar un electrón en su estado fundamental de un átomo en estado gaseoso. La reacción se puede expresar de la forma siguiente:



Donde  $A(g)$  representa la cantidad de los átomos del estado gaseoso de un determinado elemento químico,  $E_i$  es la energía de ionización y  $e^-$  un electrón [45]. Lo anterior representa la primera ionización, la segunda ionización (mayor energía que la primera) representa la energía necesaria para sustraer el segundo electrón y así sucesivamente. La energía de ionización se expresa en electronvoltios o julios.

$$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C} \times 1 \text{ V} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J} \quad (2.16)$$

A continuación se muestra en la Figura 2.2 [46], la relación de la energía de ioni-

zación con los elementos de la tabla periódica.

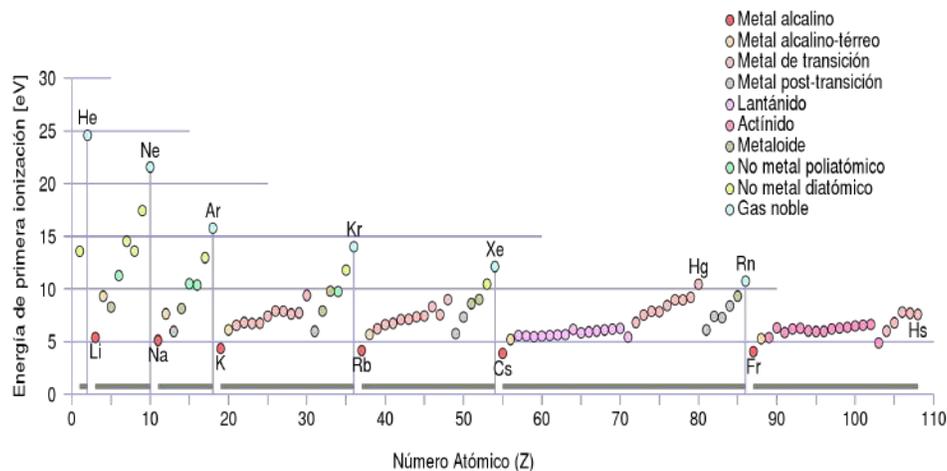


Figura 2.2: Energía de ionización respecto al número atómico de algunos elementos químicos (Cortesía: Creative Commons Atribución 3.0 Unported [46]).

## 2.5. Fuentes de iones a partir del plasma

Este tipo de dispositivo tiene la función de producir un haz de iones, es decir, partículas cargadas eléctricamente. Además, se ha expuesto que la configuración más común consiste de una cámara de producción de plasma, seguido de un sistema de extracción. No existe una única fuente de iones para todas las aplicaciones, el empleo de una técnica de ionización específica dependerá del tipo de partícula deseada, del espacio, dinero y expertos disponibles [47–49]. En la Tabla 2.2, se nombra las especificaciones más comunes de los tipos de fuente de iones.

Tabla 2.2: Clasificación de las fuente de iones.

Fuente de iones		
Generación de iones	Tipo de partícula	Aplicación
Plasma	Iones positivos	Aceleradores (científico, médico)
Bombardeo de electrón	Iones moleculares	Grabados, Litografía
Irradiación láser	Iones negativos	Recubrimiento en nanomateriales
Transferencia de carga	Cluster	Propulsores iónicos

Los dispositivos que se basan en la generación del plasma como producción de

iones, integrados por un sistema de extracción, son esencialmente fuentes de iones. En la Figura 2.3 se muestran los más comunes.

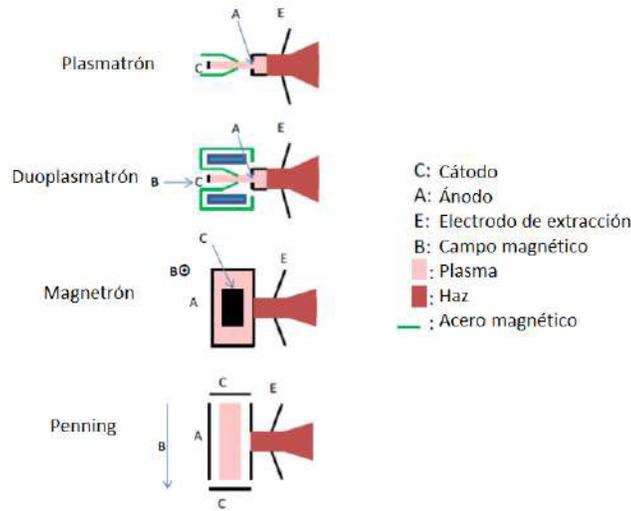


Figura 2.3: Diferentes fuentes de iones a partir del plasma. Se enlista, en la parte derecha, las características principales del dispositivo. La generación del plasma, así como el sistema de extracción cambian en cada fuente. Esto es debido a su aplicación.

### 2.5.1. Adaptación del límite de plasma

La cámara de plasma así como la extracción de los iones, deben cumplir con cierto límite entre ellos. La distancia entre el sistema de extracción y el plasma se considera pequeña, de lo contrario, el haz se dispersa rápidamente. De igual manera, existe una relación entre el diámetro de salida de los iones y la trayectoria que viaja debido al voltaje aplicado. Si los límites están lejos, el haz se dispersa antes de llegar al electrodo de extracción, de lo contrario, existe una forma definida entre los límites y el haz bien formado, como se muestra en la Figura 2.4. Este efecto se atribuye a que las cargas de signos iguales, se repelen, y por lo tanto existe una fuerza de repulsión entre ellas, que hace que el haz de iones diverja.

La relación ( $S$ ) entre el radio de salida del haz ( $r$ ) y la distancia entre el electrodo de extracción y el plasma ( $d$ ), viene dado por:

$$S = \frac{r}{d} \quad (2.17)$$

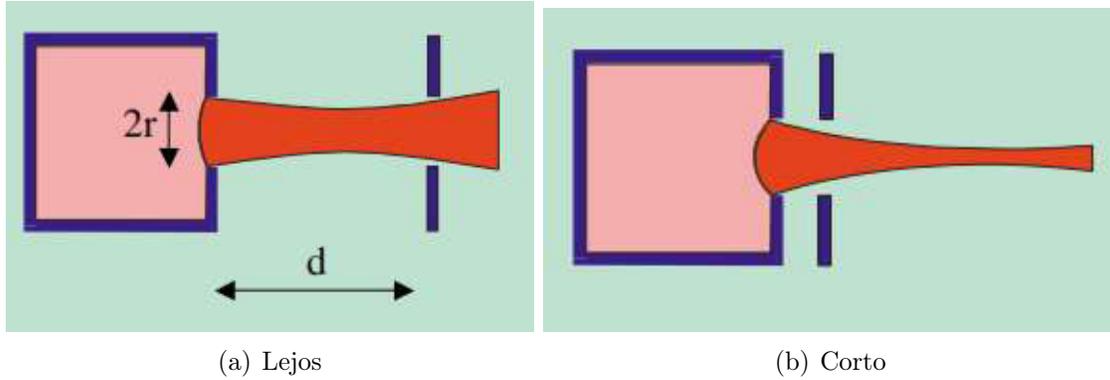


Figura 2.4: Distancias entre los límites del electrodo y el plasma, donde  $r$  es el radio de abertura de la salida de los iones y  $d$  es el espaciamiento entre la abertura y el electrodo de extracción. (a) Muestra la divergencia del haz debido al espaciamiento entre ambos, mientras que en (b) se observa la convergencia del haz, ya que la distancia entre ellas es mínima.

El rango apropiado para el distanciamiento entre el electrodo y el plasma, se encuentra entre 0.3 a 0.6 [50].

### 2.5.2. Reactor de plasma tipo capacitivo e inductivo

En la Figura 2.5, se observa el esquema básico de conexión de los reactores: capacitivo (CCP - Capacitively Coupled Plasma) e inductivo (ICP - Inductively Coupled Plasma) [51, 52].

Para generar el plasma, se requiere de condiciones favorables, como por ejemplo: vacío en la cámara mayor a  $10^0$  mbar, características del generador RF, entre otras [53]. En el Laboratorio de Plasma, de la División de Ciencias e Ingenierías (DCI), se tiene el generador RF: 0613 GTC de 13.56 MHz de la empresa AJA International, INC., conectado a un Matching Network. Éste funciona, principalmente, como una resistencia para protección del equipo. El Matching Network AIT-600R genera un sistema de voltaje real de la forma:

$$V_{RF} = \sqrt{2PZ} \quad (2.18)$$

Donde  $P$  es la potencia y  $Z$  la impedancia. De acuerdo a las especificaciones del manual de uso, indica que la potencia máxima del equipo es de 600 W y la impedancia

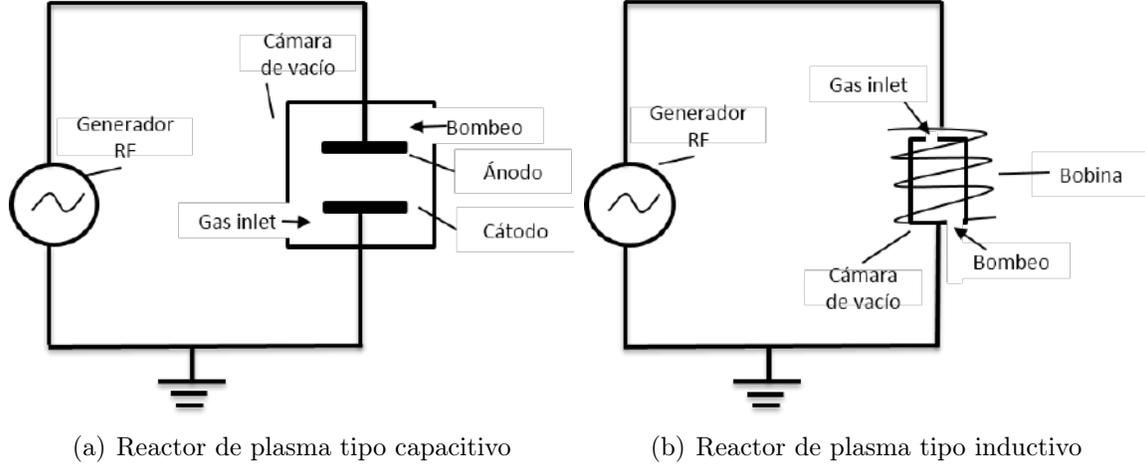


Figura 2.5: Bosquejo de conexión electrónica básica de los reactores conectado a un generador de radiofrecuencia (RF). (a) Este reactor está compuesto por dos electrodos a una mínima distancia entre ellos, y básicamente dos orificios; entrada del gas y bomba de vacío. (b) Lo integra una cámara de vacío, dos orificios como en el caso (a), y una bobina de cobre enrollada a la cámara.

de  $50 \Omega$  con una corriente eléctrica máxima  $I$  de  $7.5 A$ . Por lo tanto, el voltaje máximo de salida es:

$$V_{RF} \approx 245 V \quad (2.19)$$

Conociendo el valor del voltaje real, entregado por el Matching Network, se analiza la generación de plasma de los reactores independientemente, y sus simulaciones.

### 2.5.3. Reactor tipo capacitivo

El gas en el interior de la cámara, se ioniza a partir del campo eléctrico producido por las placas paralelas de ésta. De acuerdo a la ley de Gauss, es bien conocida esta geometría y su solución [54]:

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_A}{\epsilon_0} \quad (2.20)$$

Donde  $\vec{E}$  es el campo eléctrico,  $d\vec{A}$  es un elemento diferencial del área de la placa,  $Q_A$  es la carga total encerrada en  $A$ , finalmente  $\epsilon_0$  es la permitividad eléctrica en el vacío. De la Ecuación (2.20), la magnitud del campo eléctrico es dada por:

$$E_0 = \frac{Q_A}{A \cdot \epsilon_0} \quad (2.21)$$

Entonces, de aquí se sabe que para aumentar la magnitud del campo eléctrico y se pueda ionizar el gas fácilmente, el área de la placa debe ser pequeña. Se tenían disponibles placas circulares de  $r \approx 5,8 \text{ cm}^2$ . El área se encuentra establecida como  $A = \pi \cdot r^2 \approx 105.68 \text{ cm}^2$  por cada placa. Sin embargo, se puede relacionar el valor del voltaje con la magnitud del campo eléctrico, de la forma siguiente, y así obtener un estudio general:

$$\Delta V = - \int_{-}^{+} \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (2.22)$$

$$E_0 = \frac{\Delta V}{d} \quad (2.23)$$

Donde  $\Delta V$  es el diferencial de potencial y  $d$  la distancia entre las placas. Esta distancia de separación entre las placas, está fijada debido a la cámara de vacío (longitud de ésta) y tiene como medida 116 mm, este parámetro no puede ser modificado, mientras que el voltaje aplicado sí. Por otra parte, para producir un plasma en un reactor de tipo capacitivo, se requieren tres puntos importantes [55, 56]:

1. La distancia entre los electrodos sea  $< 2 \text{ cm}$ .
2. Suministrar un gas fácil de ionizar, por ejemplo: H.
3. Producir un vacío  $> 10^{-3} \text{ torr}$ .

#### 2.5.4. Reactor tipo inductivo: Campo magnético generado por una bobina helicoidal

Este tipo de reactor, requiere una bobina, por lo que es necesario encontrar la densidad de flujo magnético  $\vec{B}$ , producido por ella. Primero, se debe parametrizar su forma geométrica, para calcular el campo magnético,  $\vec{B}$ . En la Figura 2.6, se presentan las características geométricas de la hélice.

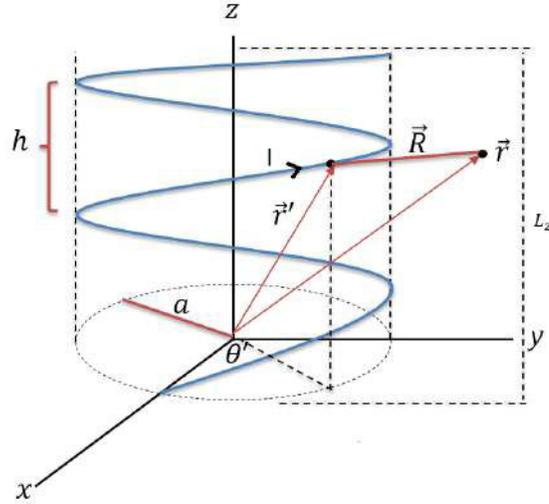


Figura 2.6: Esquema geométrico de la bobina helicoidal. Cada uno de los parámetros representados, se refieren a:  $\vec{r}'$  el vector de trayectoria,  $a$  el radio de la hélice,  $I$  la corriente que circula en la bobina,  $h$  el espaciamiento entre cada vuelta,  $L_z$  la longitud de la bobina helicoidal,  $\theta'$  ángulo relacionado con el vector de trayectoria y  $\vec{r}$  el vector de observación.

Aquí  $\vec{R} = \vec{r} - \vec{r}'$ , y la longitud total final del cable formado por la hélice se expresa como:

$$L_{total} = N\sqrt{h^2 + 4(\pi^2)a^2} \quad (2.24)$$

De la Ecuación (2.24),  $N$  es el número de vueltas. Para encontrar el vector  $\vec{r}'$ , que genera la trayectoria de la Figura 2.6, basta conocer que en el plano  $xy$  se forma un círculo y que va aumentando en el eje  $z$  por el espaciamiento  $h$  y el giro del ángulo  $\theta'$ . Por lo tanto, el vector de posición, se escribe de la forma:

$$\vec{r}' = a\cos(\theta')\hat{i} + a\sin(\theta')\hat{j} + \frac{h\theta'}{2\pi}\hat{k} \quad (2.25)$$

La parametrización del ángulo, adopta la forma siguiente:

$$\theta' (0 \leq \theta' \leq 2\pi N) \quad , \quad N = \frac{L_z}{h} \quad (2.26)$$

Para verificar, que efectivamente,  $\vec{r}'$  es la trayectoria de la hélice, se puede utilizar un programa que genera la trayectoria, como es el caso del programa Wolfram

Mathematica que muestra la trayectoria del vector, vea Figura 2.7.

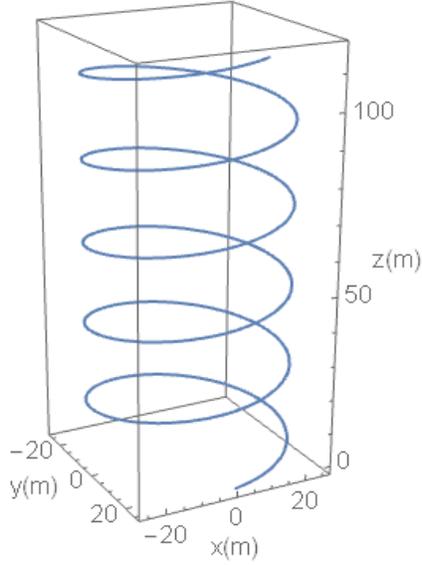


Figura 2.7: Trayectoria del vector posición generada con el software Mathematica. Se ilustra la comparación con la Figura 2.6. Los parámetros usados fueron:  $a = 26.3 \text{ mm}$ ,  $h = 23 \text{ mm}$  y  $L_z = 116 \text{ mm}$ , esto fue debido a las medidas disponibles para la construcción del dispositivo.

Si se considera que el número de vueltas del cable de cobre que rodea al reactor es de cinco, considerando la relación de la Ecuación (2.26). La densidad de flujo magnético, se obtiene a partir de la ley de Biot-Savart [57]:

$$\vec{B}(x, y, z) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_c \frac{I'(t)(d\vec{r}' \times \vec{R})}{\|\vec{R}\|^3} \quad (2.27)$$

Como la corriente  $I'(t)$  no tiene dependencia respecto a  $\theta'$ , ya que  $I'(t) = I_0 \cdot \text{sen}(2\pi ft)$  donde  $I_0$  es la amplitud y  $f$  la frecuencia, entonces se puede extraer de la integral, por lo tanto, adopta la forma siguiente:

$$\vec{B}(x, y, z) = \frac{\mu_0 I'(t)}{4\pi} \int_c \frac{(d\vec{r}' \times \vec{R})}{\|\vec{R}\|^3} \quad (2.28)$$

En este caso, el elemento del vector  $d\vec{r}'$  coincide con la dirección de la corriente  $I'(t)$ , el vector  $\vec{R}$  es la distancia entre el punto de observación y el punto dado por

la hélice, finalmente,  $\mu_0$  es la permeabilidad magnética en el vacío, cuyo valor es  $4\pi \times 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A}$ . Aplicando la ley de Biot-Savart en forma vectorial, la densidad de flujo magnético viene dada por:

$$\vec{B}(x, y, z) = B_x(x, y, z)\hat{i} + B_y(x, y, z)\hat{j} + B_z(x, y, z)\hat{k} \quad (2.29)$$

De acuerdo a las Ecuaciones (2.28) y (2.29), los términos pueden ser escritos como:

$$B_x(x, y, z) = \frac{\mu_0 I'(t)}{4\pi} \int_0^{2\pi N} \frac{dr'_y \cdot R_z - dr'_z \cdot R_y}{\|\vec{R}\|^3} \quad (2.30)$$

$$B_y(x, y, z) = \frac{\mu_0 I'(t)}{4\pi} \int_0^{2\pi N} \frac{dr'_z \cdot R_x - dr'_x \cdot R_z}{\|\vec{R}\|^3} \quad (2.31)$$

$$B_z(x, y, z) = \frac{\mu_0 I'(t)}{4\pi} \int_0^{2\pi N} \frac{dr'_x \cdot R_y - dr'_y \cdot R_x}{\|\vec{R}\|^3} \quad (2.32)$$

Estas integrales (2.30 - 2.32) no se pueden resolver de forma analítica directamente, debido a la dificultad de la integral, por lo tanto es necesario resolver de forma numérica [58]. Finalmente, la magnitud de la densidad de flujo magnético en el punto de observación es:

$$\|\vec{B}(x, y, z)\| = \sqrt{\|B_x(x, y, z)\|^2 + \|B_y(x, y, z)\|^2 + \|B_z(x, y, z)\|^2} \quad (2.33)$$

Como se observa, la densidad de flujo magnético total, se obtiene por medio de la superposición de las contribuciones generados por cada término. Para realizar la integración numérica, se considera el radio de la hélice,  $a = 0.0263$  m, el espaciamiento entre vueltas,  $h = 0.023$  m, la longitud,  $L_z = 0.116$  m, la corriente como,  $I'(t) = 7.5$  A, y finalmente, la permeabilidad magnética en el vacío,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m.

### 2.5.5. Ley de Child-Langmuir

En esta subsección, se aborda la simulación de la trayectoria de los iones y la emisión en diferentes puntos del recorrido del haz. Además, la relación entre el voltaje aplicado al cátodo de esta cámara, y la corriente detectada por la placa detectora. Para conocer el funcionamiento de esta cámara, se procede a explicar brevemente la ley de Child-Langmuir [59]. Se asumen dos electrodos: A y B, donde el potencial en B es cero y el potencial en A es  $V_1$ , vea Figura 2.8. Además, existe un número enorme de iones en el electrodo A, la fuerza electrostática causará los movimientos de los iones al electrodo B, produciendo una corriente.

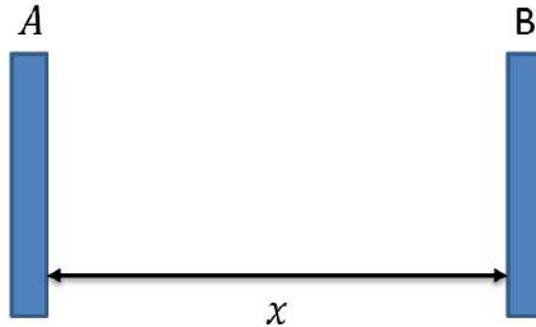


Figura 2.8: Bosquejo simplificado de dos electrodos separados a una distancia  $x$ , en este tipo de sistema rige la ley de Child-Langmuir.

De acuerdo a la ecuación diferencial de movimiento, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{q}{m} \frac{dV}{dx} \quad (2.34)$$

Donde  $v$  es la velocidad,  $V$  el voltaje aplicado y  $q/m$  es la relación carga-masa de la partícula, para este caso, de los iones. Al resolver la Ecuación Diferencial Ordinaria, y considerando que la densidad de carga es:  $\rho = nq = \frac{J}{v}$ , entonces, la Ecuación (2.34) adopta la forma:

$$\rho = \frac{J}{\sqrt{\frac{2q}{m} (V_1 - V)}} \quad (2.35)$$

Cuando  $V = 0$  en electrodo B, se hace uso de la ecuación de Poisson para encontrar el valor del potencial eléctrico [60]:

$$\nabla^2 V_1 = -\frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (2.36)$$

Donde  $\varepsilon_0$  es la permitividad eléctrica en el vacío. Sustituyendo la Ecuación (2.35) en (2.36), y resolviendo la ecuación diferencial de segundo orden, se obtiene la ecuación de Child-Langmuir [61]:

$$J = \frac{I}{S} = \frac{4\varepsilon_0}{9x^2} \sqrt{\frac{2q}{m}} V_1^{\frac{3}{2}} \quad (2.37)$$

Donde  $J$  es la densidad de corriente (ampere por metro cuadrado),  $I$  es la corriente detectada en el electrodo B,  $x$  la separación entre electrodos y  $S$  el área interna de la superficie del electrodo. El valor de  $q/m$  para iones positivos en unidades electrostáticas es aproximadamente [62]:

$$\frac{q}{m} \approx 12 \times 10^{12} \frac{\text{statC}}{g} \approx 4,003 \times 10^6 \frac{C}{Kg} \quad (2.38)$$

Como se observa, la relación carga-masa de los iones tiene proporción más pequeña en comparación con la del electrón. Esto es debido a que la masa del ion es más grande que la del electrón. La Ecuación (2.38), suele escribirse de la siguiente forma:

$$P = \frac{I}{V^{\frac{3}{2}}} \quad (2.39)$$

Donde  $P$  es conocido como "perveance", que depende de la geometría del electrodo, y es dada por:

$$P = \frac{4\varepsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2q}{m}} \frac{S}{x^2} \quad (2.40)$$

Finalmente, con las ecuaciones anteriores se ha mostrado brevemente la función de la segunda cámara de forma analítica, el cuál es acelerar los iones y detectar la corriente que llega al electrodo.

# Capítulo 3

## Metodología

La realización de la fuente de iones que se reporta en esta tesis, se llevó a cabo en tres etapas: diseño mecánico, simulación física y construcción. Cada etapa es importante para obtener resultados preliminares y comparar con las pruebas a las que se somete el prototipo, ya construido. Se buscó elaborar este dispositivo de forma simple, en otras palabras, construir las cámaras de generación y extracción de iones con materiales de fácil adquisición, además, como primera aproximación se logró obtener un haz de iones no fino, es decir, dispersado. Se simplificó el sistema de extracción. Se añadió un solenoide en la trayectoria de las partículas, con el fin de reducir la divergencia debido a la mutua repulsión de los iones del propio haz.

Los materiales utilizados para crear el prototipo, fueron obtenidos del Laboratorio de Plasma del Taller de la División de Ciencias e Ingenierías (DCI), de la Universidad de Guanajuato (UG). Esto con el objetivo de que la fuente de iones fuera reproducible en un laboratorio, donde se encuentren los equipos necesarios para su fabricación. A continuación, se detallan las tres etapas para la elaboración de la fuente.

### 3.1. Diseño mecánico de la fuente de iones

El dispositivo está constituido por dos cámaras, cada pieza fue diseñada independientemente, para que finalmente se ensamblaran y conectaran todos los elementos,

con sus planos y medidas correspondientes. Con ayuda del programa CAD (Diseño Asistido por Computadora), Autodesk Inventor Professional se diseñaron y se obtuvieron los planos de la fuente. Cabe señalar, que antes de realizar los diseños, se tomaron las medidas de los materiales disponibles para su elaboración.

### 3.1.1. Planos de la primera cámara: Reactor de plasma

La primera cámara estuvo conformada por dos tapas de aluminio 6061 estándar. Ambas tenían un orificio de 13 mm, con el objetivo de ensamblar una Brida NW10, en una de ellas, y la otra para que los iones circulen libremente a la cámara posterior. Esta brida tiene un diámetro de 13 mm. Las medidas se observan en la Figura 3.1.

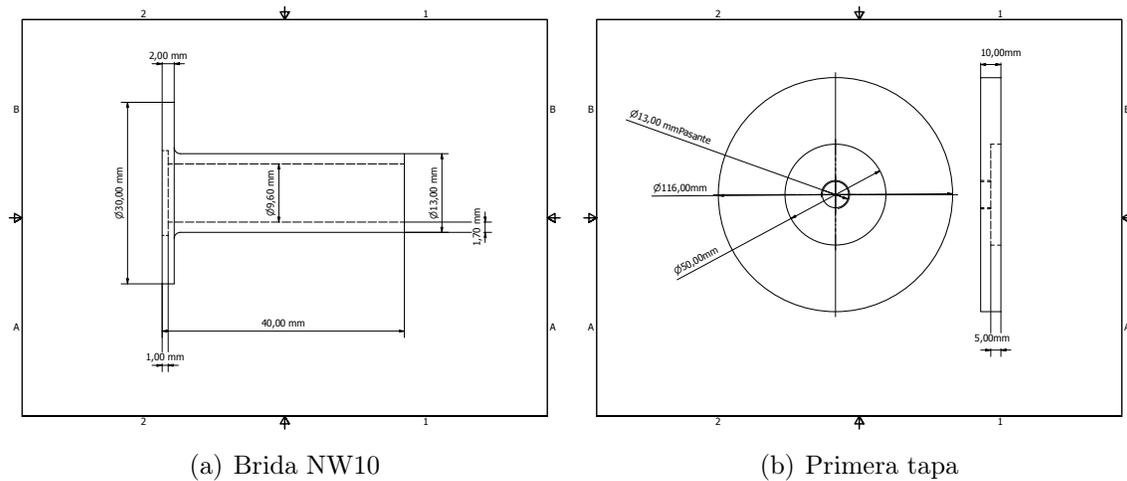


Figura 3.1: (a) Dimensiones de la brida NW10, ésta sirvió como conexión entre el sistema de vacío y el reactor de plasma. (b) Tapa principal que va ensamblada con la brida, además contiene una circunferencia de 50 mm de diámetro y una profundidad de 5 mm, diseñada para el ensamble con la cámara de vidrio.

Para ensamblar ambas piezas de la figura anterior, se tuvo que realizar una rosca en la brida y tapa. La segunda tapa del reactor tiene las mismas dimensiones que la tapa principal, esto se observa en la Figura 3.2, sin embargo, se realizaron orificios alrededor de ella, éstos se encontraban en la periferia y eran los responsables del ensamble con la segunda cámara, de extracción de iones, mientras que el orificio del centro fue la salida de los iones; formados en el reactor de plasma. Cada uno de ellos tenía un diámetro de 6 mm, que se hicieron mediante una broca milimétrica *M6*. La

abertura de salida, se optó por un diámetro de 6 mm, para minimizar la dispersión del haz al salir de la cámara [63].

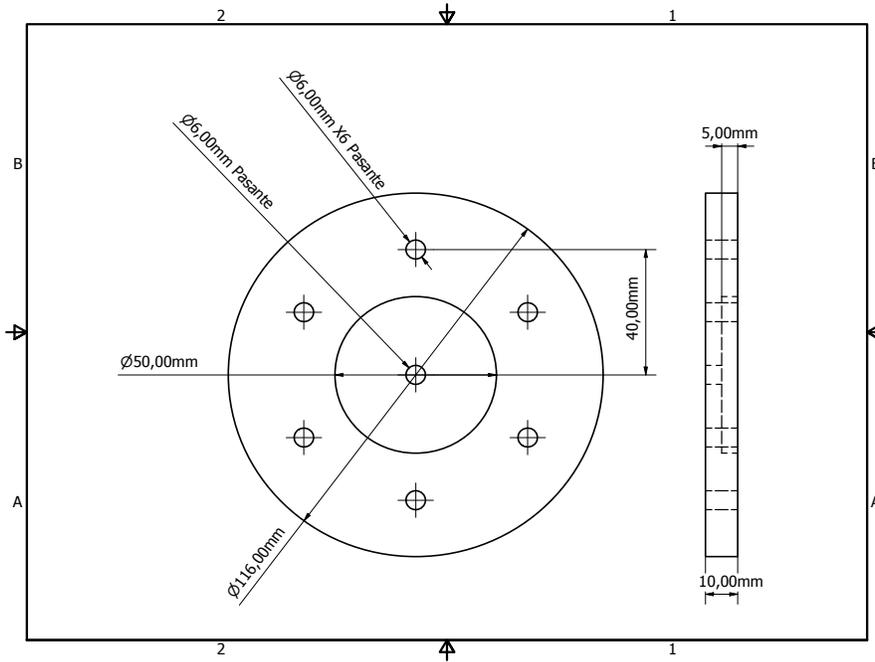


Figura 3.2: Tapa secundaria del reactor de plasma, alrededor de ella, pasantes para pernos *M16* que sujetan esta cámara con el sistema de extracción.

Para la cámara de producción, se usó un vidrio de borosilicato marca KIMAX® [64], de diámetro 50 mm con la capa exterior y 116 mm de largo. También, se diseñó la bobina hecha de un cable de cobre esmaltado calibre 10, AWG 10, medidas del calibre de alambre estadounidense (American Wire Gauge) [65]. En medidas milimétricas, el diámetro de este calibre fue de 2.6 mm. En el estudio teórico, el radio se consideró  $a = 26.3$  mm, debido al radio de la cámara: 25 mm, más el radio del cable: 1.3 mm. El espaciamiento entre las vueltas de la bobina, se decidió que fuera a  $h = 23$  mm, esto es debido a la longitud disponible en el tubo de vidrio ( $L_z = 116$  mm) lo que da como resultado el número de vueltas,  $N = \frac{L_z}{h} \approx 5$ . La longitud de cobre utilizado, de acuerdo a la Ecuación (2.24) fue de  $L_{total} \approx 834,20$  mm. Se observó que la magnitud del campo magnético, a medida que el espaciamiento entre las vueltas decrece, el problema analítico se puede volver complicado, y los integrandos oscilan cada vez más, lo que provocaría dificultades numéricas [66].

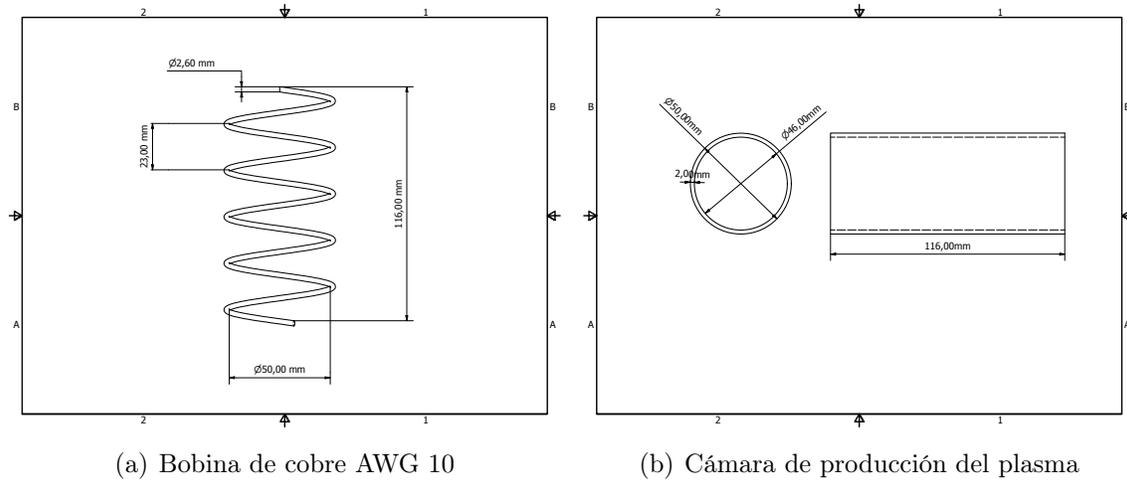


Figura 3.3: (a) Diseño de la bobina con geometría helicoidal, este tipo de material y calibre soporta hasta 30 A de intensidad de corriente, (b) Vidrio borosilicatado resistente, durable con resistencia térmica y química altas.

El vacío es un parámetro importante en el dispositivo. Se diseñó esta cámara con la finalidad de generar al menos  $10^0$  mbar de presión. Para esto, se requirió y diseñó empaques entre el tubo de vidrio y las tapas de aluminio, que sirvieron como ensamble para producir el vacío buscado. A este tipo de empaque se les conoce como O rings (por su forma geométrica), cuya función es el sellado. Cabe mencionar que un buen vacío depende principalmente de la potencia que tenga la bomba, con ésta se puede crear un mejor vacío.

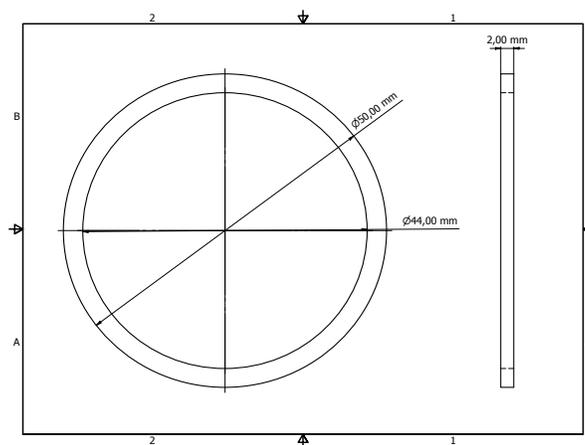


Figura 3.4: Esquema del empaque de sellado con las dimensiones correspondientes para el dispositivo.

### 3.1.2. Planos de la segunda cámara: Extracción de iones

El sistema de extracción constó de dos placas circulares paralelas entre sí, distanciadas por medio de una cámara de vidrio borosilicatado. Las placas de aluminio se conectan a una fuente de alto voltaje, con la finalidad de crear una diferencia de potencial tal que el campo electrostático generado, ejerza una fuerza de atracción a distancia con los iones, como se explicó en la teoría, debido a la Ecuación (2.37) de Child-Langmuir. El plasma contiene una gran variedad de especies: electrones, iones negativos, entre otros, por lo que se requiere que el haz no sea una combinación de especies sino de iones, por lo tanto se diseñó un sistema simplificado para extraer iones positivos. A diferencia de los iones negativos, que al extraerlos, también se extraen electrones, dado que el signo de sus cargas son iguales. Debido a lo anterior, se tendría que diseñar un sistema que separe ambas partículas (se puede lograr con un campo magnético que deflacte a los electrones). La tapa principal de esta cámara es idéntica a la mostrada en la Figura 3.2, mientras que la tapa secundaria, encargada de detectar a los iones, se diseñó de acuerdo a la Figura 3.5.

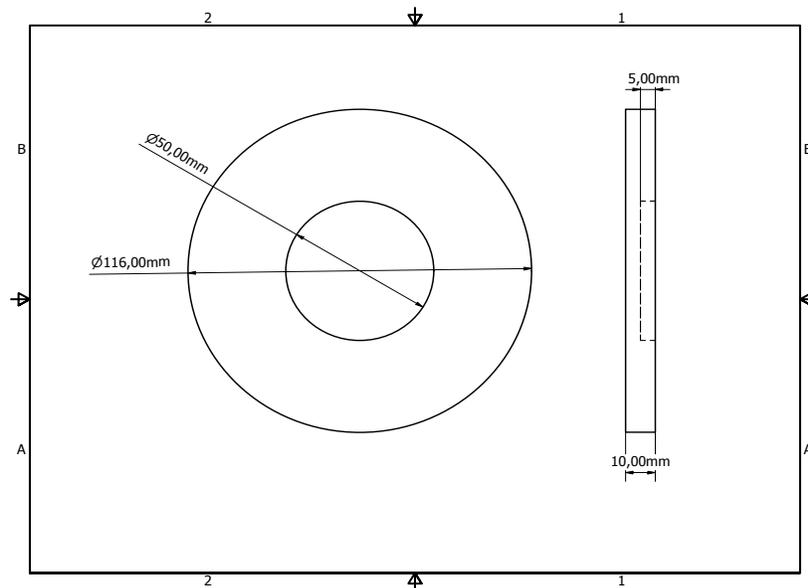


Figura 3.5: Placa detectora que contiene una circunferencia concéntrica de 5 mm de profundidad, diseñada para insertar la cámara. En éste, chocan los iones, creando así una intensidad de corriente que puede detectarse con un amperímetro convencional que registre escalas pequeñas de amperes.

La cámara de vacío donde circula el haz, fue del mismo material utilizado en el reactor: vidrio de borosilicato, véase Figura 3.6. Además, para mantener un buen sellado y producir un vacío medio, se colocaron empaques de nitrilo, con una forma similar a la tapa correspondiente a la Figura 3.2.

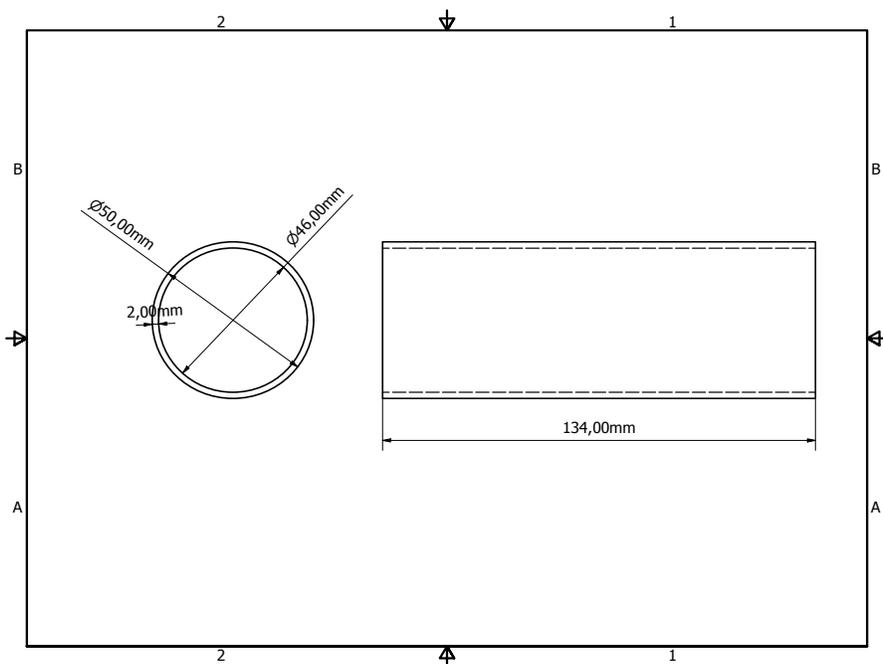


Figura 3.6: Tubo de vidrio KIMAX®, de longitud 134 mm, con esta medida se observó claramente el haz de iones y se minimizó la dispersión del mismo.

### 3.1.3. Ensamble de las cámaras

Para esta etapa se buscó evitar fugas en el vacío, por lo que se buscó que los empaques, tornillos (M6×1 en medida milimétrica) y las tuercas estuvieran adaptados a la misma medida para que embonaran a la perfección. Nos aseguramos de que cada componente preservaba la independencia de las cámaras (reactor-extractor) y conservaba el vacío buscado. Ahora bien, para lograrlo se requirió de materiales adecuados que cumplieran la función, por lo que se llevaron a cabo simulaciones de la fuente de iones ensamblada, con cada pieza correspondiente, y así obtener resultados que logren mostrar su operación. En la Figura 3.7 se presenta las dimensiones y estructuras de cada uno de estos elementos. Donde (a) es el diseño del elemento de unión de 40

mm de rosca y 6 mm de diámetro, con separación de 1 mm, (b) el sellado de vacío entre tuerca y perno, de 6.10 mm de diámetro y 1.70 mm de ancho, (c) tuerca con un agujero circular en el centro labrado en forma helicoidal que se ajusta a la rosca del tornillo para fijarlo y (d) diseñado para mantener un vacío medio, con grosor de 3 mm y medidas idénticas a las tapas de conexión entre las cámaras que componen a la fuente de iones.

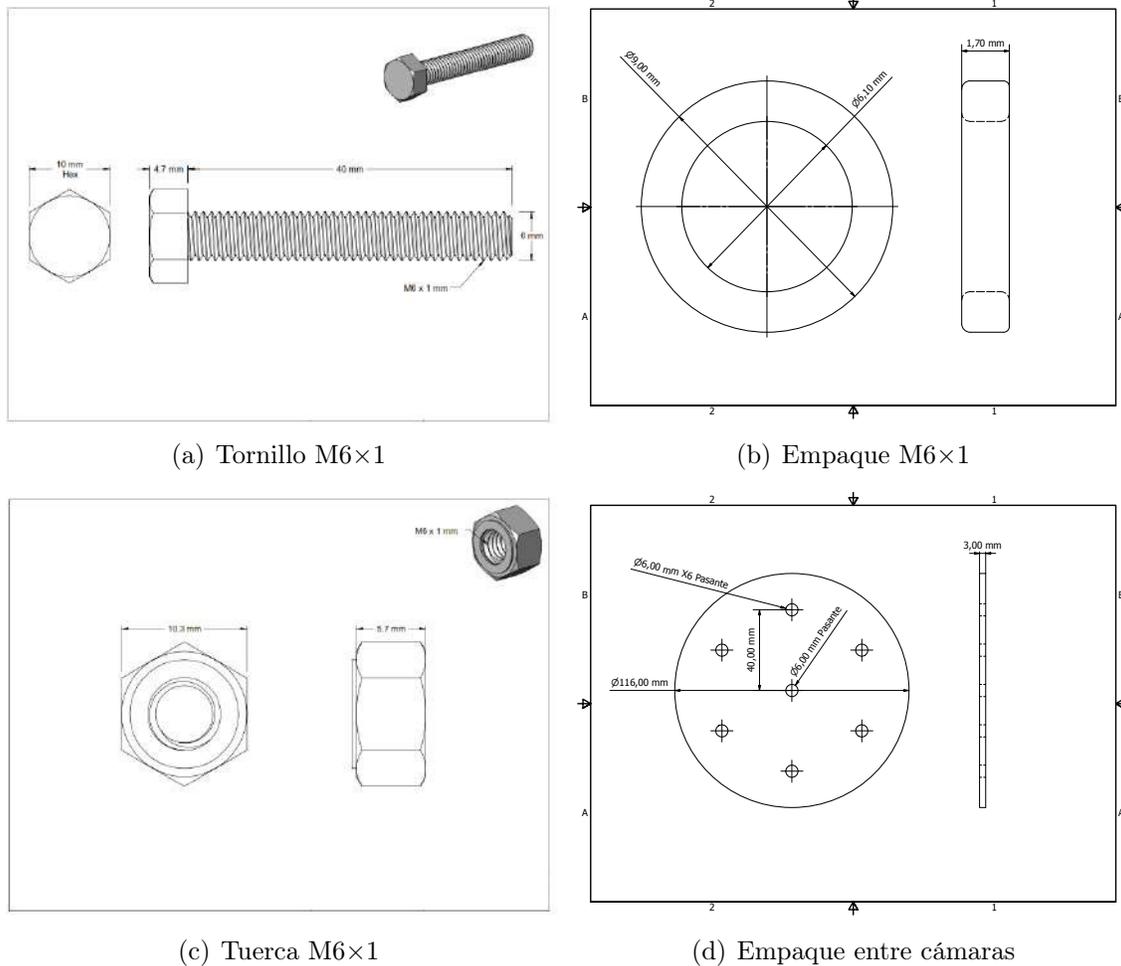


Figura 3.7: Elementos de conexión entre ambas cámaras.

## 3.2. Simulación física de la fuente de iones

La simulación de la fuente de iones, se llevó a cabo utilizando el software COMSOL Multiphysics <sup>®</sup>. El reactor de plasma se simuló de dos formas diferentes: capacitivo

e inductivo para estudiar ambos resultados. En el caso del sistema de extracción, se simuló la trayectoria de partículas, así como la dispersión del haz. En la Figura 3.8 se muestra la idea principal de simulación en ambas cámaras.

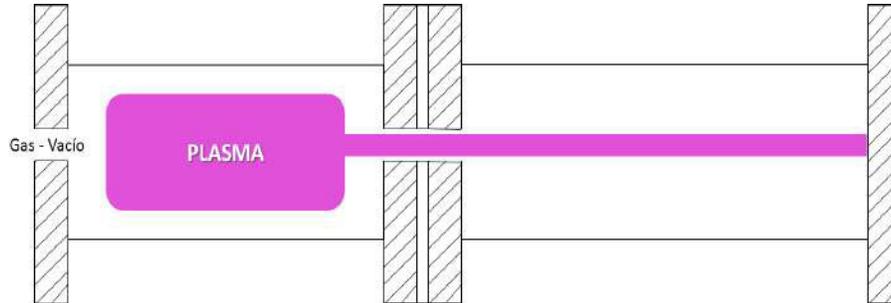


Figura 3.8: Bosquejo simple de producción y aceleración de iones. Idea general de simulación en el software COMSOL, de ambas cámaras, a partir de un gas dado.

### 3.2.1. Reactor de plasma

Se exportaron los diseños de la cámara y se ensamblaron en el programa de simulación. Posteriormente, se les asignó un material a cada elemento de ésta. Se hace un corte transversal del reactor ( $r = 0$ ), tanto capacitivo como inductivo, con el fin de definir las condiciones correspondientes del plasma.

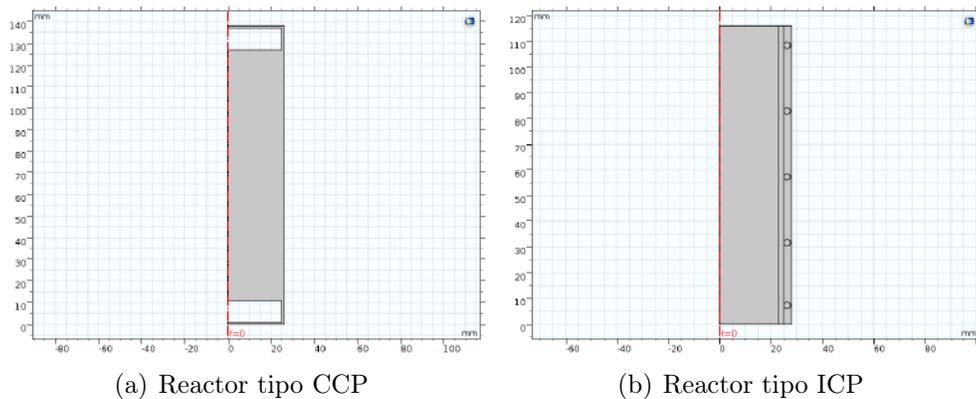


Figura 3.9: (a) Reactor constituido de dos placas de aluminio estándar 6061 conectadas a la fuente RF: 0613 GTC de 13.56 MHz, paralelas entre sí y distanciadas por una cámara de vidrio borosilicatado. Como estudio preliminar del plasma, se usó aire como gas para su ionización. (b) Cámara de vacío del mismo material que el reactor CCP, y mismo gas, más sin embargo, la fuente RF se conectaba a la bobina de cobre esmaltado de calibre 10 y con 5 vueltas.

### 3.2.2. Sistema de extracción

Se exportaron los elementos de la cámara y posteriormente se ensamblaron. Las placas se conectaron a una fuente de alto voltaje para que los iones fueran atraídos por esta fuerza a distancia.

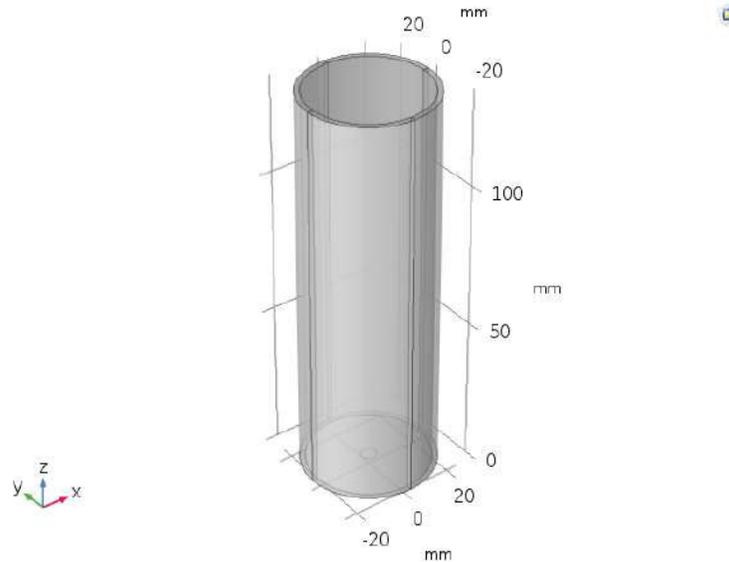


Figura 3.10: Cámara de extracción formado por dos placas de aluminio estándar 6061 y un vidrio de borosilicato. En la placa de extracción, se encuentra un orificio concéntrico de 6 mm de diámetro; salida de los iones. Se conectó a una fuente de alto voltaje a 1 kV y la placa detectora se conectó a un sensor de corriente para obtener la relación entre el voltaje aplicado y la corriente detectada.

Se mantuvieron las mismas condiciones que en el reactor de plasma: vacío y iones del gas. El estudio se hizo en tres dimensiones, debido a la trayectoria de las partículas y su dispersión en la cámara.

### 3.3. Construcción de la fuente de iones

De acuerdo a los pasos previos, se logró estimar los resultados para poder construir el dispositivo y someterlo a prueba. Se usó un torno para moldear las tapas de aluminio, una vez hechas, se cortaron en una sierra mecánica. El paso siguiente, fueron los orificios que se realizaron en una fresadora, para obtener precisión en el diámetro requerido. Posteriormente, se hizo el molde helicoidal de la bobina de cobre,

en una impresora 3D Creality CR-10S, para después dar forma al cable.

Para evitar el contacto, entre las tapas de las cámaras al momento de unir las, se eligió trabajar con un material aislante, en este caso se optó por el PLA (ácido poliláctico) para los tornillos. Éstos se construyeron en la impresora 3D. De igual manera, para el empaque de conexión entre las cámaras, se utilizaron cinco materiales aislantes, vea Figura 3.16 . Los sellos se construyeron a base de nitrilo. Las cámaras de vacío se obtuvieron de una probeta marca KIMAX®, este material se escogió debido a su durabilidad a bajas presiones [67]. La probeta se cortó en tres secciones, los bordes se lijaron con la finalidad de alisar y mejorar el acabado para evitar fugas.

### 3.3.1. Tapas de aluminio estándar 6061

Para las tapas se usó aluminio el cual se encontraba en una presentación de cilindro de aproximadamente 20 cm de longitud. De acuerdo a los planos de la Figura 3.1 (b), el ancho de las tapas que conforman el dispositivo es de 10 mm, por lo que se procedió a maquinar cada una de ellas. Se utilizó el torno universal ZMM SLIVEN modelo CU 500 de la marca Cormetal. Se colocó en él, la barra de aluminio para procesarlo. Primero se hizo un barrido en el exterior del cilindro, para conseguir uniformidad en el diámetro de 116 mm, así como en la cara expuesta en el torno, para precisar la llanura. Por último, se procedió a dar forma al disco de circunferencia concéntrica de 50 mm y 5 mm de profundidad. Posteriormente se cortó a 10 mm de espesor. Los cortes se hicieron en una cortadora de sierra (Metal cutting band saw) modelo BS-712 de la marca Birmingham.

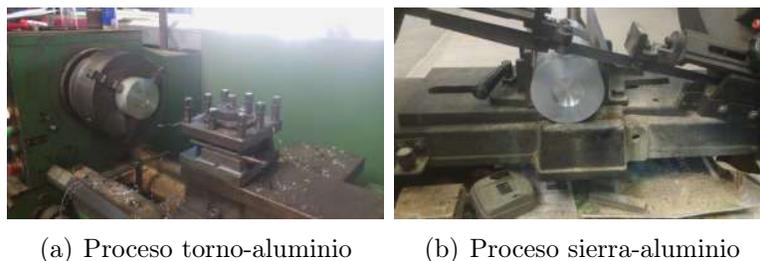


Figura 3.11: (a) Primer paso de la elaboración, (b) seguido del corte individual, sin embargo, se lleva al primer paso nuevamente con la cara expuesta debido al corte, para obtener una llanura definida en ella.

Este proceso de corte se repitió cuatro veces, debido a que se requerían cuatro tapas. Al final las tapas se lavaron con agua y estopa para quitarles las limaduras que quedaban adheridas, el resultado final del maquinado de la barra, se muestra en la Figura 3.12:



Figura 3.12: Maquinado de los elementos de aluminio, con las dimensiones expuestas en los planos de diseño.

Los orificios de las tapas de unión, se hicieron por medio un taladro de banco Vimalert M15 y una broca milimétrica M6. Adicionalmente, la de conexión con la Brida NW10, se maquinó mediante el torno, que se usó como tarraja para generar la rosca en la brida, y se utilizó un machuelo para generar la parte interna en la tapa; ambas con medida milimétrica M12×1.



(a) Tapas de ensamble entre las dos cámaras

(b) Conexión vacío-reactor

Figura 3.13: (a) Perforación pasante, encargados de sujetar por medio de pernos aislantes la fuente de iones, en el centro se encuentra la salida de éstos, (b) la brida fue adquirida por un distribuidor especializado, se incorporó a la tapa mediante una cinta de teflón que mantuvo el sellado.

### 3.3.2. Vidrio refractario de borosilicato

La probeta fue cortada en tres partes, con un especialista en vidrio. Se usaron únicamente las dos piezas que no estaban conectados con la base de apoyo, que se encuentra en la parte inferior del instrumento. Debido a que los cortes de las piezas se encontraban disparejas, se esmerilaron los tubos de vidrios en los cortes. El proceso consistió en lijarlos cuidadosamente, para evitar dañarlos. Se eligieron diferentes tipos de lijas de la marca Fandeli: grano medio: J-86 (100), G-88 (120), fino: A-99 (360) y extrafino: B-99 (2000).



(a) Vista 1

(b) Vista 2

Figura 3.14: Extremos esmerilados, del contorno de la superficie cortada. Después del proceso de lijado, se logró la finura con agua y B-99. Finalmente, se lavó las cámaras con acetona para disolver manchas, aceite, polvo y esmalte.

### 3.3.3. Conexiones para el ensamblaje

De acuerdo a los elementos de conexión, mostrados en la Figura 3.7. Se procedió a construir cada uno de ellos, excepto la tuerca MX1, ésta se compró de manera convencional. Los pernos se imprimieron con la ayuda de una impresora 3D de marca Creality CR-10S con filamento de PLA. Los empaques de nitrilo que sellan las tuercas, con los tornillos, se mandó a construir con las medidas correspondientes. El sellado que une las cámaras de la fuente, se fabricó con cinco diferentes tipos de materiales.



Figura 3.15: El diseño del tornillo MX1, se exportó al programa Ultimaker Cura 4.0, encargada de vincular el objeto con su impresión. Se imprimió en un PLA Blanco con 95 % de relleno y una resolución de 0.1 mm a 210° C en la boquilla extrusora.



Figura 3.16: Empaques de unión entre el reactor de plasma y el sistema de extracción: silicón, PVC, caucho, nitrilo y PLA (de izquierda a derecha). El dispositivo se ensambló y se probó el mejor material que mantenía el vacío esperado, según los resultados de las simulaciones.

### 3.3.4. Formación de la bobina

Se encuentran contruidos y adquiridos, todos los componentes de la fuente, excepto la bobina de cobre esmaltado AWG 10. Se compró un rollo de este tipo de cable, luego se formó la geometría helicoidal, con ayuda de la impresora 3D, Creality CR-10S.

Se diseñó la forma que adoptaría la bobina, con las características que se observan en la Figura 3.3 (a). Entonces se imprimió la base por medio del programa Cura, con PLA rojo a 30 % de relleno y una resolución de 0.1 mm a 210° C en la extrusora. Una vez impreso el sólido, se siguió a darle forma al cable de cobre, para esto, se usó el torno universal paralelo, éste cuando giraba, envolvía firmemente el cable, para formar la bobina.

Una vez hecha cada pieza, se procede a su ensamble. Cabe mencionar que la fuente de alto voltaje para acelerar a los iones fue de la marca Leybold-521721 que genera

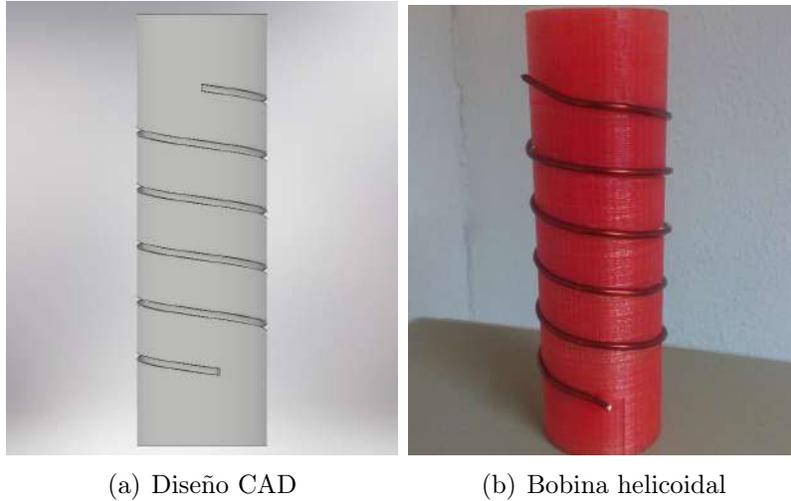


Figura 3.17: (a) Se construyó un cilindro hueco, de 5 mm de grueso, como soporte, donde se encontraba incrustado la forma de la hélice, que formaría la bobina. (b) Resultado final, después de ser sometido al torno.

hasta 50 kV, ésta se conectaba a la fuente por medio de cables banana-caimán y, además, un amperímetro convencional de la marca Steren, que detectaba la corriente producida por los iones.

# Capítulo 4

## Resultados

En este capítulo, se muestran los resultados del diseño mecánico del dispositivo, seguido de sus características, posteriormente, se muestra el proceso de simulación física, el cual involucra la generación del plasma y la extracción de iones. Finalmente, la construcción del dispositivo, es mostrada según las observaciones de los pasos previos, con el fin de comparar las partes teórica y experimental, respectivamente.

### 4.1. Diseño mecánico

Antes de construir un dispositivo, es ideal poder diseñarlo ante un programa para conocer de antemano, su estructura y sus características mecánicas. Por tal motivo, se procedió a diseñar la fuente de iones con sus características mecánicas en un programa de diseño, para así tener una base de construcción a partir de los planos de trabajo.

Se utilizó el programa Autodesk Inventor Professional 2019, para diseñar la fuente. El dispositivo constaba con la cámara de producción de iones y la cámara de extracción, primera y segunda, respectivamente. En la primera cámara, el plasma se genera a partir de un campo magnético encargado de ionizar el gas. Este campo se induce mediante una bobina conectada a un generador de radiofrecuencia (RF) de 13.56 MHz.

El primer diseño en elaborarse fue la cámara de producción de iones, es decir, el reactor de plasma tipo inductivo. Como se ha mostrado en los capítulos anteriores,

los materiales asignados a la fuente se describen en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Materiales de la primera cámara.

Piezas y materiales	
No. Pieza	Material
2 Tapas	Aluminio 6061 estándar
1 Tubo	Vidrio refractario de borosilicato, KIMAX®
2 Empaques	Nitrilo
Brida NW10	Acero inoxidable
Cable AWG 10 (calibre 10)	Cobre esmaltado

De acuerdo a los materiales presentados, y a los diseños de cada pieza del reactor, se procedió a ensamblar. En la Figura 4.1 se muestra el ensamble..

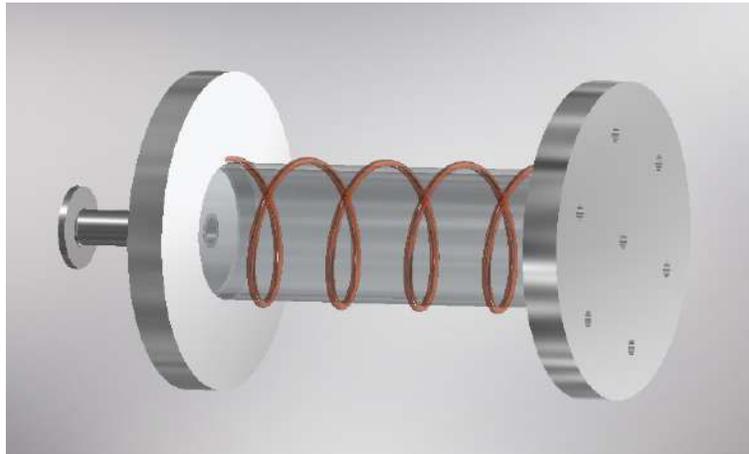


Figura 4.1: Reactor de plasma tipo inductivo, en la parte izquierda se encuentra la brida, cuya función es suministrar el sistema de vacío a la cámara. En la parte derecha, se encuentra la tapa de unión que contiene 6 orificios de fijación a la cámara extractor.

Cabe mencionar que en la unión del dispositivo, hay un orificio en el centro de 6 mm de diámetro, dicho orificio es la salida de los iones que se produció en la cámara. Ahora bien, es importante conocer la magnitud del campo magnético producido en la bobina. Para estudios preliminares, se ionizó el aire como primer caso de estudio. El aire es una mezcla de gases, compuesto mayormente por nitrógeno (78.09%), oxígeno (20.95%) y pequeñas cantidades de otros gases. Se utilizó el programa Wolfram Mathematica Free Trial para obtener la integración numérica, de la densidad de flujo magnético total. A continuación, se muestra el resultado:



Figura 4.2: Densidad de flujo magnético a través de la longitud  $L_z$  de la bobina a corriente constante  $I_0 = 7.5$  A, esta longitud coincide con la longitud de la cámara de vacío. El eje horizontal  $Z(m)$  representa la dirección donde se encuentra ésta, desde el punto  $(0,0)$  hasta  $(0,116,0)$ , en el eje vertical se muestra la densidad de flujo magnético en Tesla.

Este resultado es el esperado y comprueba la teoría, ya que a medida que el punto de observación se aleja a la izquierda o derecha de la cámara, la densidad del flujo magnético va decreciendo. Sin embargo, la densidad es mayor dentro de la cámara de vacío, y además, su valor máximo está en el centro, 58 mm. Aunque en este caso, el resultado obtenido fue a corriente constante, por lo que se generalizó el estudio con una corriente variable, encargada de ionizar el gas y cuya forma se define como:  $I'(t) = I_0 \cdot \text{sen}(2\pi ft)$ , con  $I_0 = 7.5$  A, y  $f = 13.56$  MHz.

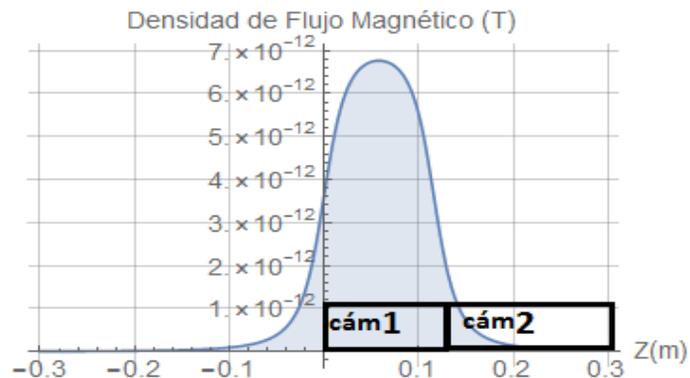


Figura 4.3: Densidad de flujo magnético a través de la longitud  $L_z$  a  $t = 1$  s.

Los rectángulos 1 y 2, representan las cámaras de la fuente de iones. Se ilustra en la Figura 4.3, que la densidad de flujo no afecta a la cámara 2, sin embargo existe una invasión mínima que se considera despreciable por su magnitud. También se observa

un comportamiento similar que en la Figura 4.2. Aunque la gráfica se encuentra en un momento dado, se sabe que la densidad de flujo magnético disminuye y aumenta, de acuerdo a la función seno que depende del tiempo. La corriente constante  $I_0$  es caso particular de  $I'(t)$ . Esto sucede cuando se obtiene el máximo en la función seno:

$$\text{sen}(2\pi ft) = 1 \quad (4.1)$$

$$2\pi ft = \frac{\pi}{2} \quad (4.2)$$

$$t = \frac{1}{4f} \approx 1,84366 \times 10^{-8} \text{ s} \quad (4.3)$$

Si se sustituye el resultado de la Ecuación (4.3) en  $I'(t)$ , entonces se recupera la Figura 4.2 demostrando la relación entre las corrientes. Se utilizó el programa COMSOL Multiphysics®<sup>®</sup>, para simular y conocer la distribución de la densidad de flujo magnético de la bobina. Primeramente, se realizó la simulación a corriente constante para observar las flechas del campo  $\vec{B}$  seguido de la corriente variable.

Los materiales designados para el sistema de extracción y detección de los iones, se enlistan en la Tabla 4.2. Posteriormente de los diseños, se ensambló el conjunto de piezas. La cámara se constituyó de la tapa de unión y la tapa detectora, unidas por la cámara de vacío. Las placas de aluminio funcionan como electrodos, para generar un campo electrostático que acelera a los iones en el plasma [68].

En la Figura 4.4 se ilustra esta cámara. El proyecto de tesis tiene su importancia y originalidad en la simplificación de una fuente de iones, muestra de ello es el sistema de detección de iones.

Tabla 4.2: Materiales de la segunda cámara.

<b>Piezas y materiales</b>	
<b>No. Pieza</b>	<b>Material</b>
2 Tapas	Aluminio 6061 estándar
1 Tubo	Vidrio refractario de borosilicato, KIMAX®
2 Empaques	Nitrilo

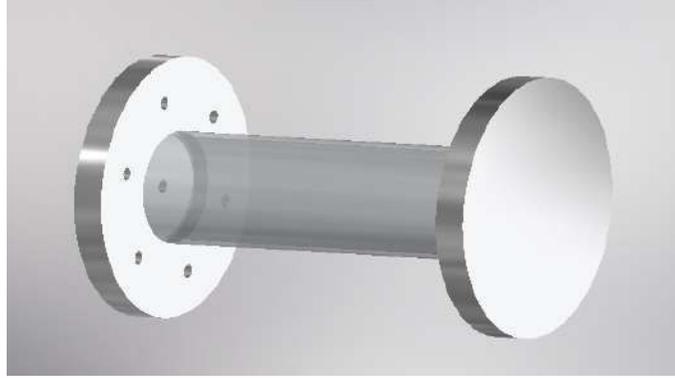


Figura 4.4: Cámara de extracción y detección de iones. La entrada de los iones se encuentra en la placa izquierda, que se conecta a una fuente de alto voltaje, los iones generan una trayectoria que choca con la placa detectora (derecha), ésta a su vez, está conectada a un sensor de intensidad de corriente. Este sistema es la consecuencia de la Ley de Child-Langmuir, que relaciona voltaje aplicado y corriente detectada.

Se definieron los materiales correspondientes para cada pieza, PLA para los pernos, fierro para las tuercas y nitrilo para los empaques. El dispositivo se encuentra conectado a una bomba mecánica, encargada de producir el vacío. Al conectar la bomba, se comprimen las componentes del dispositivo, debido a la baja presión, y se sella completamente la fuente de forma hermética.

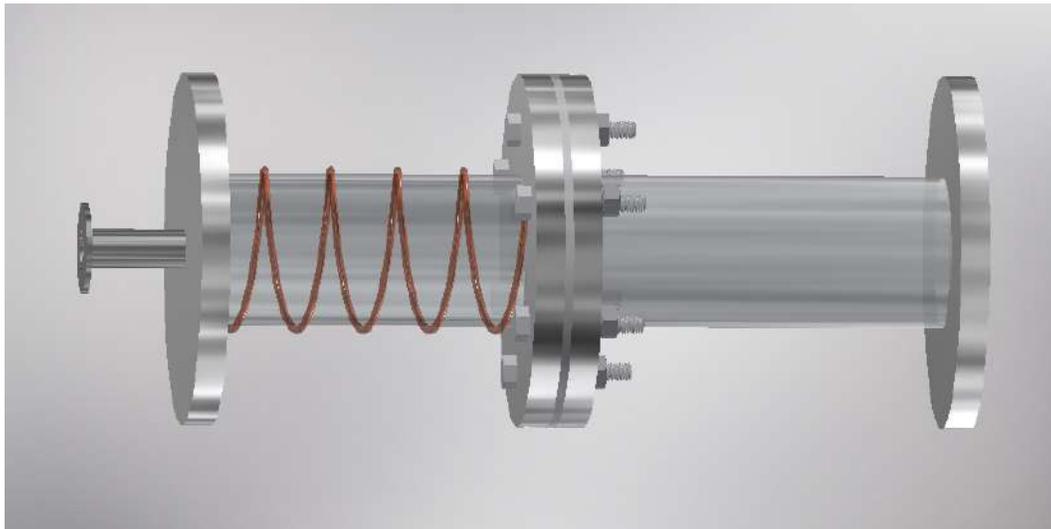


Figura 4.5: Diseño mecánico de la fuente de iones, a la izquierda la cámara de generación del plasma y a la derecha la cámara de extracción. En la unión se colocaron los O rings y el empaque entre el reactor y el extractor.

## 4.2. Simulación física

La fuente de iones se ensambló de manera exitosa en el diseño mecánico, por lo consiguiente, se estudió la simulación física del dispositivo. Este proceso fue muy importante, debido a su referente esencial para la construcción del dispositivo. Además, la comparación entre la teoría y la práctica, fue posible mediante este paso. Esta sección estudia las dos cámaras del dispositivo, independientemente. Se simuló el plasma producido en la primera cámara, con las condiciones necesarias para su generación por medio de la inducción de la densidad de flujo magnético derivado de la bobina.

Asimismo, se simuló la trayectoria de los iones, y la relación entre el voltaje aplicado y la corriente detectada, en el sistema de extracción. Ahora bien, se ha escogido la generación del plasma por medio del reactor de plasma tipo inductivo y no capacitivo. A continuación, se presentan las razones.

El voltaje real producido por los equipos es aproximadamente 245 V con potencia de hasta 600 W, según la Ecuación (2.19). Utilizando Comsol, se obtuvo los resultados de los reactores CCP e ICP. Se inició con el modelo CCP. Los parámetros de simulación fueron las siguientes:

Tabla 4.3: Parámetros de simulación física del reactor capacitivo.

<b>Parámetros de simulación</b>	
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Potencia	1 W, 50 W, 100 W, 600 W
Vacío	0.1 mbar $\approx$ 0.075 torr
Gas	Aire

El reactor se conectó al generador RF: 0613 GTC acoplado al Matching Network, utilizado en la fuente de iones, con una corriente variable respecto al tiempo. Se escogió el tiempo a  $t = 1$  s en todas las gráficas presentadas en la Figura 4.6 con un vacío medio [69].

(a) El reactor a 1 W de potencia, genera 10 V entre las placas paralelas. En la barra de valores de la densidad de iones del gas que se encuentra a la derecha, se registra la densidad mínima (azul) hasta la máxima (rojo oscuro), pasando por un espectro de colores entre ellos. Se nota que la máxima densidad de iones por metros

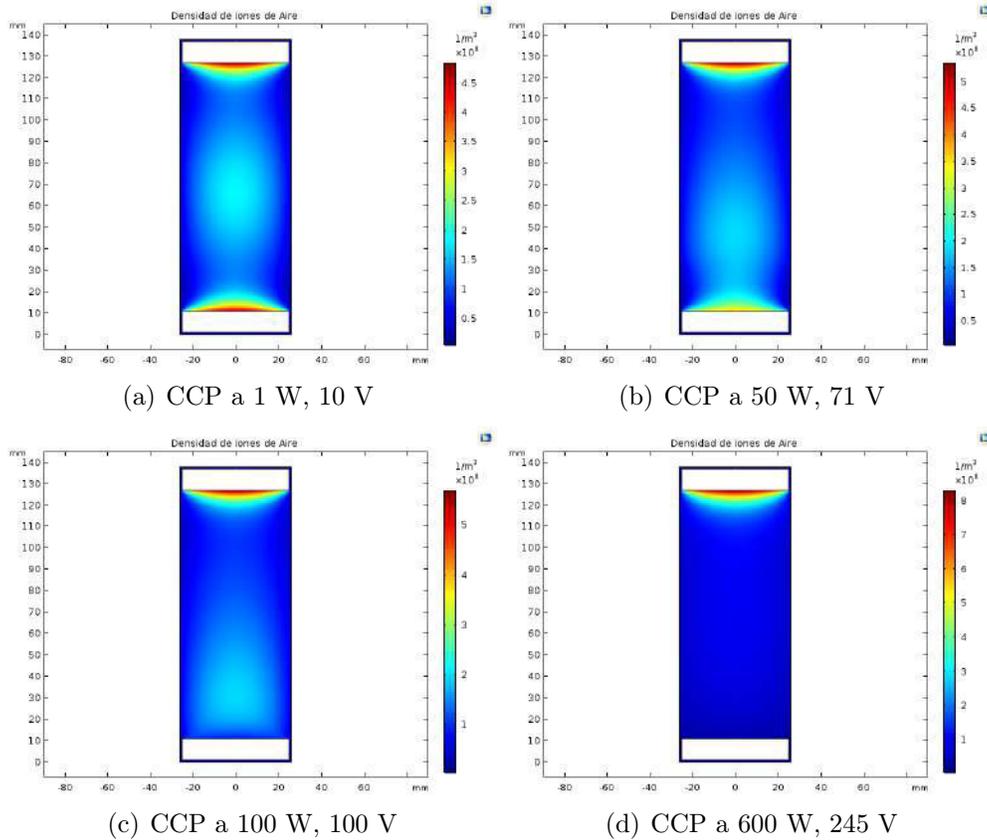


Figura 4.6: Reactor capacitivo a diferentes potencias usando el generador de RF.

cúbicos se localizan en las placas, en el centro hay poca distribución de densidad, al transcurrir el tiempo esta potencia es insuficiente para generar el plasma.

(b) A 50 W de potencia, se generan 71 V, se observa que la máxima densidad se concentra en una de las placas, mientras que se disminuye en la otra. La distribución se ha movido del centro, sin embargo, sigue siendo insuficiente para generar un plasma estable con mayor producción de iones.

(c) Existe un voltaje de 100 V, cuando se le suministra 100 W de potencia. La concentración se mantiene en la misma placa y se ha incrementado en él el número de densidad de iones por metros cúbicos. Mientras se ha desvanecido en la otra tapa la densidad. En este punto, sigue siendo inestable el plasma.

(d) Con la máxima potencia que producen los equipos y con 245 V, se ha aumentado la densidad de iones y concentrado únicamente en la placa superior, pero en el resto de la cámara es mínima la distribución de iones, por lo tanto, el plasma es

pequeño y reducido a una cierta región, insuficiente para genera un haz.

En resumen, a medida que se aumenta la potencia, se incrementa el voltaje real de salida y con ello, la densidad de iones que se van concentrando en una de las placas. Sin embargo, no es suficiente generar un campo eléctrico idóneo para producir la ionización del gas en toda la cámara. Lo anterior concuerda con la teoría mostrada en la sección 2.5.3 del Capítulo de Marco teórico, ya que se pueden obtener mejores resultados en cuatro diferentes casos: reducción de la distancia entre las placas, producir un alto vacío en la cámara, introducir un gas fácil de ionizar y por último, incrementar el voltaje aplicado en el reactor.

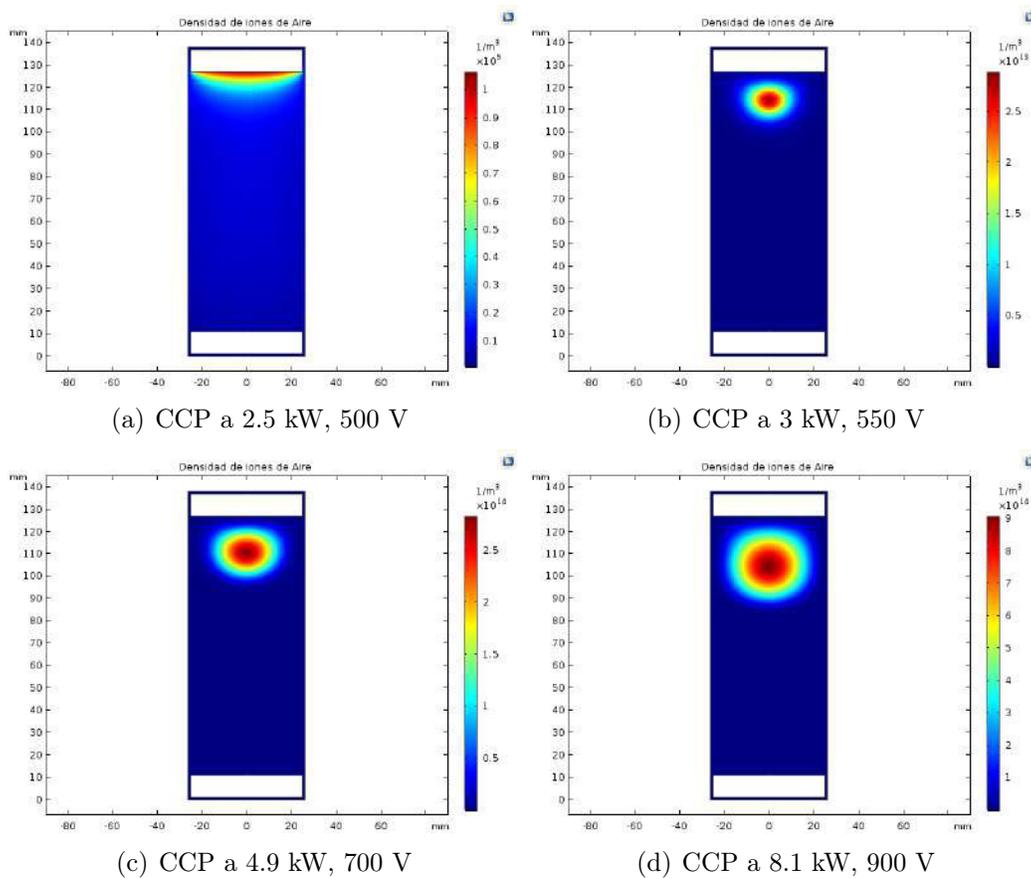


Figura 4.7: (a) Si se aumenta el voltaje a 500 V, se aumenta la densidad de iones en la placa, más no se genera el plasma en toda la cámara. (b) Se observa que a partir de 550 V, el plasma se empieza a expandir y se desprende de la placa, aumentando la densidad de iones por metro cúbico. (c) En 700 V, se aumenta la distribución y se observa un plasma cuasiestable. (d) Finalmente, a 900 V se produce un plasma estable que a medida que pase el tiempo, va expandiéndose en todo el volumen de la cámara, sin embargo, al aumentar el voltaje, se obtienen mejores resultados.

Debido a las condiciones que se tiene de la fuente de iones, la única alternativa viable sería de incrementar el voltaje en el reactor. Por otra parte, al aumentar el voltaje en la simulación, para encontrar en qué valor del voltaje se puede generar un plasma estable y que ocupe el volumen de la cámara. Como se aprecia en la Figura 4.7. La densidad de iones va en aumento, si aumenta el voltaje. Aunque para el proyecto de tesis, se ha excedido el valor del voltaje máximo otorgado por la fuente RF acoplado al Matching Network. En otras palabras, no es posible generar el plasma con un reactor capacitivo con las condiciones y los equipos que se encuentran disponibles. Por lo tanto, la generación del plasma por medio de un reactor capacitivo no es viable debido a las razones presentadas. Pero antes de concluir las razones, se procede a presentar los resultados de las simulaciones del reactor de plasma tipo inductivo.

#### 4.2.1. Reactor tipo inductivo

En la sección 4.1, se mostró un análisis de la densidad de flujo magnético producido por la bobina. En esta sección se presentan los resultados de la simulación a corriente constante y variable.

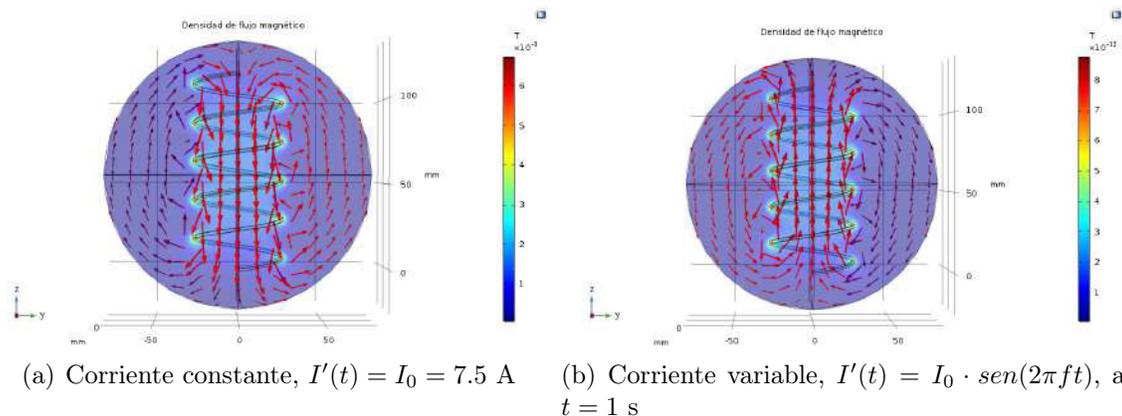


Figura 4.8: Simulación de la bobina conectada al generador RF de 13.56 MHz. (a) En la barra de colores de la derecha, se muestra los valores de la densidad de flujo magnético en Tesla, desde el valor mínimo (azul) hasta el máximo (rojo oscuro), se observa que solamente existe densidad de flujo dentro de la bobina, y alrededor de ésta, siendo los valores máximos en el contorno de cada vuelta. (b) Las flechas del campo cambian de sentido a medida que pasa el tiempo, debido a la naturaleza de la corriente variable, también los valores de la densidad de flujo magnético varían.

Los resultados de la Figura 4.8, concuerdan con los resultados obtenidos, en la sección 4.1, mediante el programa Wolfram Mathematica Free Trial. La densidad de flujo magnético encuentra sus valores máximos alrededor de la bobina, y se pueden observar las flechas del campo magnético, que es lo que se esperaba; curvas cerradas [70]. La densidad de flujo magnético no afecta la segunda cámara del dispositivo como se mencionó en la Figura 4.3, de hecho, va decreciendo rápidamente [71]. A continuación, se presentan las simulaciones que se obtuvieron de la generación del plasma, en el reactor inductivo. Se realizó en las mismas condiciones que en el caso capacitivo (Tabla 4.3).

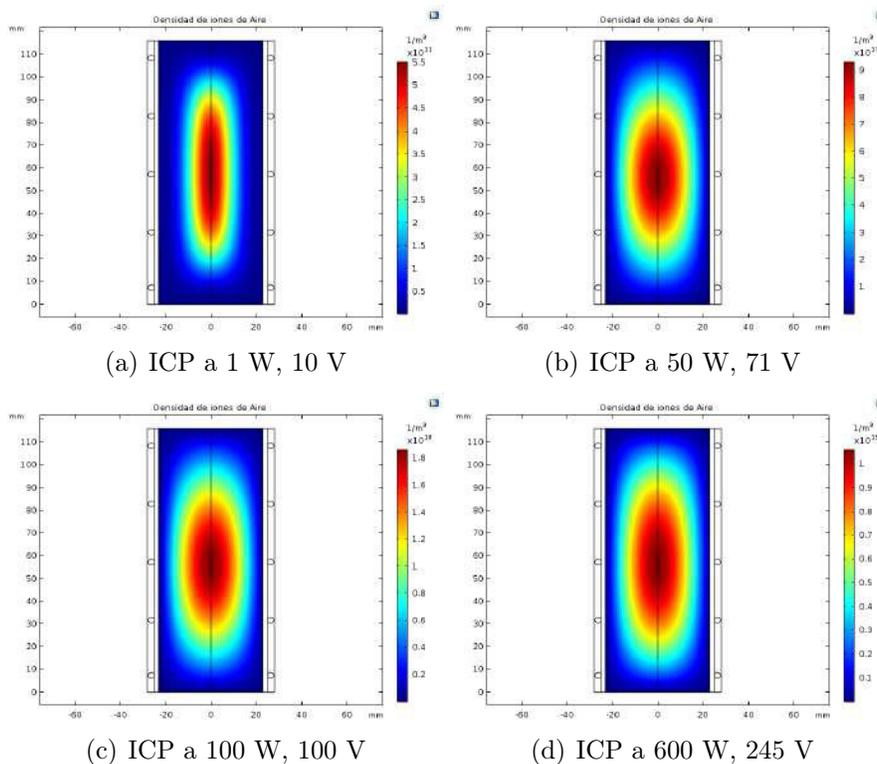


Figura 4.9: Reactor inductivo a diferentes potencias usando el generador de RF. (a) Inicialmente, la producción de iones se genera fácilmente a 1 W de potencia, sin embargo, la densidad de iones por metros cúbicos es pequeña cerca de las paredes (azul) y máxima en el centro (rojo oscuro), pero estable y el plasma cubre gran parte de la cámara. (b) A 50 W el plasma se expande en casi toda el volumen, aumenta la densidad de iones del gas y los valores máximos se encuentra en el centro. (c) La distribución de los iones es mayor y se observa que en las paredes la densidad aumentó, el plasma es muy estable a esta potencia. (d) Finalmente, a la máxima potencia de la fuente, la densidad aumentó a una escala de  $10^{19}$  de iones por metros cúbicos y cubre prácticamente toda la cámara.

### 4.2.2. Simulación de la segunda cámara

Las placas de aluminio del sistema de extracción, contienen aberturas redondas, de la ecuación de Child-Langmuir, para este tipo de geometría, la cantidad de corriente de iones detectada puede ser escrito como [72]:

$$I = \frac{4\pi\epsilon_0}{9} b^2 \sqrt{\frac{2q}{m}} V^{\frac{3}{2}} \quad (4.4)$$

Donde  $b = \frac{a}{d}$ ,  $a$  es el radio de abertura de salida de los iones, y  $d$  la distancia de separación entre el plasma y la abertura. De acuerdo a los valores proporcionados en la Tabla 4.4, se obtuvo la gráfica de la Ecuación (4.4) que se puede observar en la Figura 4.10.

Ley de Child-Langmuir	
Constante	Valor
Voltaje aplicado (V)	(0,50,1000) V
Radio de abertura (a)	3 mm
Separación plasma-abertura (d)	10 mm
Permitividad en el vacío ( $\epsilon_0$ )	$8,8541 \times 10^{-12} \frac{C^2}{N \cdot m^2}$

Tabla 4.4: Valores de las constantes.

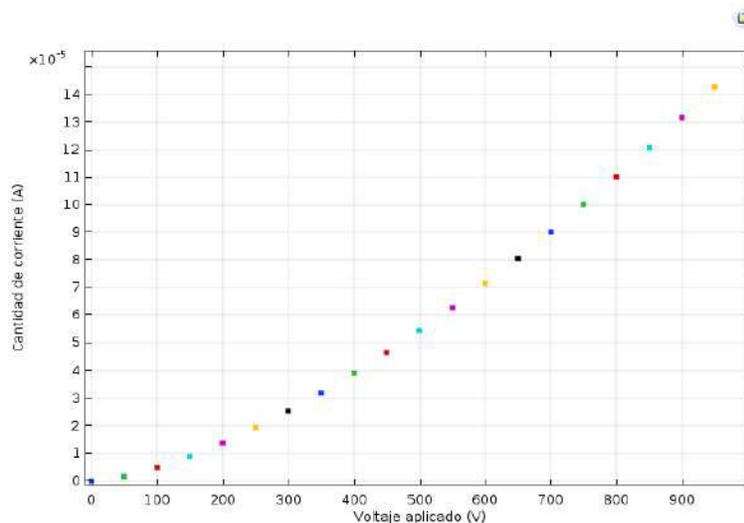


Figura 4.10: Gráfica de relación entre el voltaje aplicado y la cantidad de corriente. En el eje horizontal se encuentran los valores del voltaje (V) y en la vertical la cantidad de corriente (A). A medida que aumenta el voltaje, aumenta la intensidad de corriente, se espera un rango de  $\mu A$  a 1 kV.

Se simuló la trayectoria de los iones y la dispersión del haz, preservando los parámetros de la Tabla 4.3 y la Tabla 4.4. Los resultados se muestran a continuación:

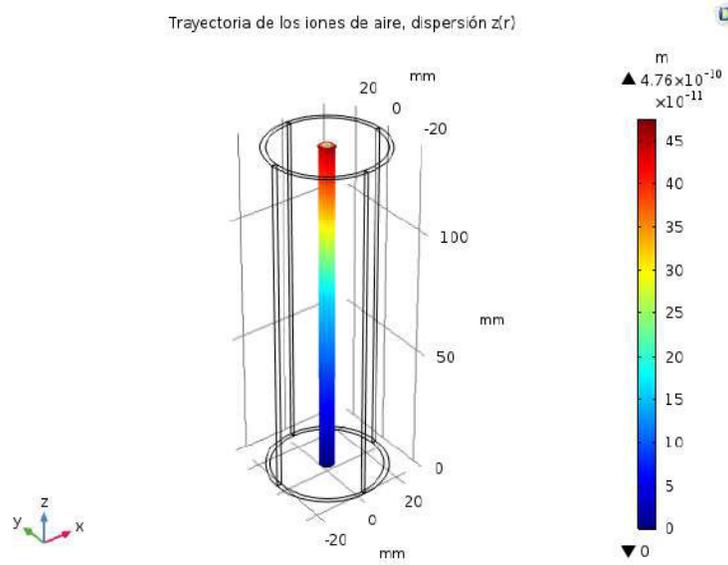


Figura 4.11: Trayectoria de los iones a través de la cámara de extracción. La etiqueta de colores a la derecha, representa el desplazamiento radial mínimo (azul) y máximo (rojo oscuro) del haz. Cuando salen los iones del plasma, conservan el radio de abertura de entrada: 3 mm, pero a medida que avanzan las partículas en la cámara de vacío, se van separando de este radio inicial, y se aumentan las distancias con respecto a éste, que da lugar a la dispersión del haz, los valores máximos se localizan al llegar a la placa detectora.

En la parte inferior de la Figura 4.11 ( $z = 0$ ), se encuentra la placa de extracción a 1 kV, y por medio de la abertura, los iones salen acelerados en trayectorias lineales. Para conocer el porcentaje de divergencia del haz, saliendo desde el electrodo de aceleración hasta la placa detectora, basta con analizar la siguiente expresión:

$$\frac{r_f}{r_i} \approx \frac{(3 \times 10^{-3})m + (4,76 \times 10^{-10})m}{(3 \times 10^{-3})m} \ll 1\% \quad (4.5)$$

El porcentaje de dispersión, del radio inicial ( $r_i$ ) comparado con el radio final ( $r_f$ ) es aproximadamente menor a 1%. Los iones positivos presentes tienen una masa mayor que la del electrón, por lo tanto, su movimiento tiende a ser más lento. Para analizar mejor la dispersión del haz, se estudió un mapa de Poincaré en tres cortes transversales. Los tres cortes se hicieron en el eje  $z : 0, L/2, L$ ; con  $L = 134$  mm en

esta cámara. En la Figura 4.12 se muestra la gráfica:

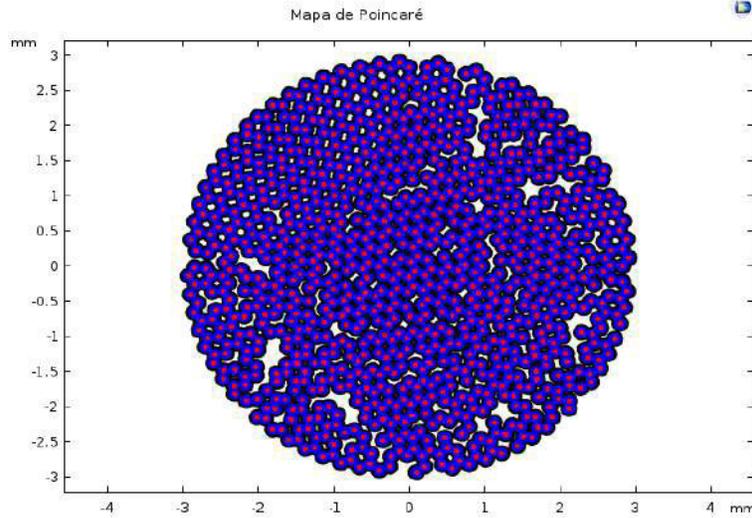


Figura 4.12: Trayectoria de los iones en  $z$  en tres cortes diferentes. Los puntos de color rojo, representan a los iones en  $z = 0$ , saliendo del plasma y entrando a la cámara de vacío. Mientras que los puntos de color azul representan la trayectoria de las partículas en  $z = L/2$ , a mitad de la cámara. Por último, los puntos de color negro, en  $z = L$ , cuando llegan a la placa detectora.

La dispersión es muy pequeña, corroborando la relación de la Ecuación (4.5). Es conocido que la velocidad de los iones es muy grande, del orden de aproximadamente  $10^4$  m/s [73]. Para conocer la velocidad del haz de iones de la Figura 4.11, basta con conocer la energía cinética. La energía cinética de un ion, cuando ha viajado del electrodo de aceleración a la placa detectora es [74]:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = qV \quad (4.6)$$

$$v = \sqrt{2\frac{q}{m}V} \quad (4.7)$$

Sustituyendo la relación carga-masa de los iones positivos expresados en la Ecuación (2.38), en la Ecuación (4.7) a 1 kV de voltaje, se obtienen los valores de la velocidad: el valor mínimo es  $\sim 2 \times 10^4$  m/s, y máximo,  $\sim 8,9 \times 10^4$  m/s. Ahora bien, conociendo el valor mínimo y máximo de la velocidad, se puede obtener la energía del haz a partir de la Ecuación (4.6).

La energía cinética del haz es, por lo tanto:

$$E_{k_{min}} \approx 35 \text{ eV} , E_{k_{max}} \approx 707 \text{ eV} \quad (4.8)$$

De lo anterior, se puede deducir que el haz, es un haz no relativista debido a la velocidad de los iones y la energía de ésta [75]. La energía cinética es pequeña para considerarse un daño significativo en el ámbito radiológico. De acuerdo a la Normas Oficiales Mexicanas y la Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en Materia Nuclear, los haces cuya energía cinética es menor a 1 MeV pero mayor a 1 eV se consideran intermedios .

### 4.3. Construcción del dispositivo

#### 4.3.1. Ensamble, pruebas y caracterización de la fuente de iones

Gracias a los pasos previos, los elementos que conforman la fuente de iones se construyeron, y se ensamblaron para crear el dispositivo. Sin embargo, antes de generar el plasma, se puso a prueba el vacío que soporta las cámaras del prototipo. Se conectaron independientemente, cada cámara, con una bomba mecánica rotativa de paletas de alto vacío Modelo RZ9, con filtro de niebla de aceite y separador montado en la entrada, marca Vacuubrand. Se usó el sensor de vacío Pirani Edwards VSP63 para conocer el valor de la presión en milibares. El vacío alcanzado fue de  $\sim \times 10^{-4}$  mbar, superando las expectativas del dispositivo. La bomba siempre estuvo encendida y conectada a la fuente de iones, para mantener un buen sellado. Se diseñó y construyó de madera una base como apoyo. Los resultados se muestran en la Figura 4.13. Por medio del sensor Pirani, se conoció la medida de la presión que se genera cuando se conectan ambas cámaras. El vacío registrado fue de  $\sim \times 10^{-1}$  mbar, de acuerdo a lo observado en las simulaciones (Tabla 4.3). Para conectar el generador RF y la fuente de alto voltaje con el prototipo, se diseñó un bosquejo de circuitos eléctricos donde se observan las conexiones y el funcionamiento general de la fuente, vea Figura 4.14.

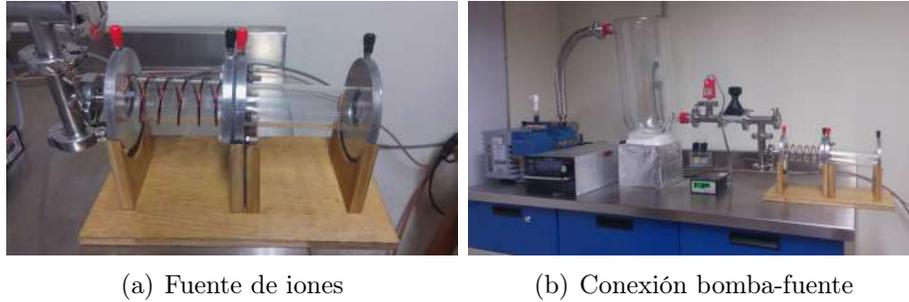


Figura 4.13: (a) Fuente de iones compuesta por un reactor de plasma y un sistema de extracción simplificado. Se insertó en cada placa una conexión hembra, para conectar de forma segura los equipos con el dispositivo. (b) Conexión bomba-fuente. Existe un conjunto elaborado de bridas, trampa de vacío, entre otros, que brindan seguridad a todo el sistema.

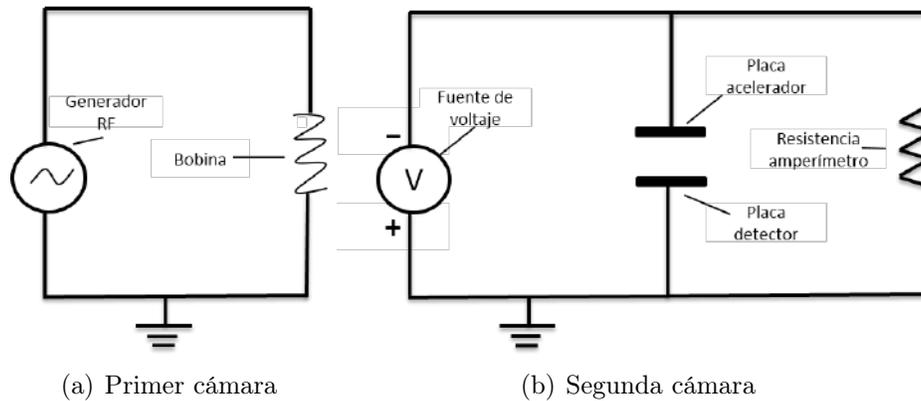


Figura 4.14: Circuitos eléctricos de la fuente de iones. (a) La bobina se conecta a la fuente RF, que produce el campo magnético, ambos comparten la misma tierra, para cerrar el circuito. (b) La placa acelerador se conecta a una fuente de alto voltaje, mientras que la placa detectora está vinculada a un amperímetro que registra la cantidad de corriente. Todas comparten la misma tierra.

Para describir, de mejor manera las conexiones, se realizó un bosquejo de la fuente de iones y las conexiones de los equipos, de una manera sencilla de observar en la Figura 4.15. Después de las pruebas de vacío y supervisión de los equipos, se inició con la etapa de producción de plasma. Se encendió todo el sistema y se programó el generador RF a dos diferentes potencias, se ionizó el aire y se obtuvo la presión buscada ( $\sim \times 10^{-1}$  mbar). Según los resultados de la simulación, el plasma se expande en todo el volumen de la cámara, a medida que se aumenta la potencia. Se hicieron dos pruebas, la primera fue a 1 W de potencia, seguido de 50 W de potencia para verificar experimento-simulación.

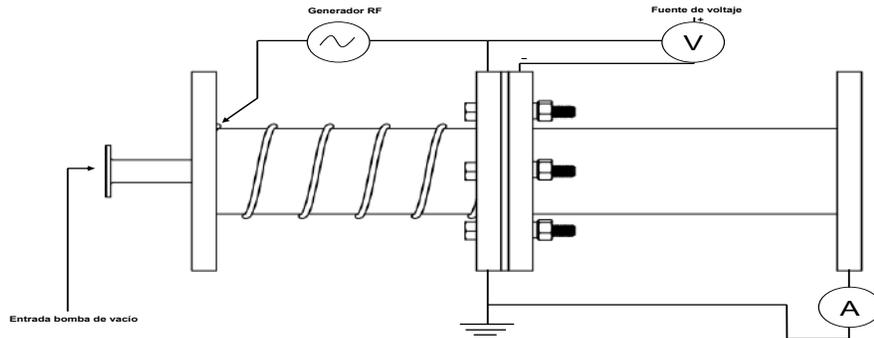


Figura 4.15: Conexión de los equipos respecto a la fuente de iones.

No se aumentó las potencias, ya que se busca, por el momento, la producción de iones y también por seguridad. En la Figura 4.16, se observan los resultados experimentales.



(a) 1 W de potencia

(b) 50 W de potencia

Figura 4.16: Reactor de plasma a distintas potencias. (a) Con esta potencia se genera el plasma, pero existe poca producción de iones y el plasma se localiza en una cierta región de la cámara. (b) Al aumentar la potencia, como en este caso, el plasma cubre completamente el volumen del reactor, y existe una cantidad mayor de iones, esto se ilustra principalmente por el espectro que emite y la intensidad.

Los resultados experimentales coinciden con los resultados en las simulaciones; al aumentar la potencia, se incrementa la densidad de iones por metro cúbico. Existe una relación estrecha entre el color emitido en el plasma y el gas. Cada gas, dependiendo de su estructura atómica, emite cierta longitud de onda, es decir, su espectro de emisión y

éste es el que determina la luz que se observa. Como se ha mencionado anteriormente, el aire es una mezcla de gases, compuesto mayormente por nitrógeno (78.09 %), oxígeno (20.95 %) y pequeñas cantidades de otros gases [76]. Como resultado de la aceleración de los iones producidos en la fuente se obtuvo que un primer intento de aceleración entre 100 V hasta 1 kV, en pasos de 50 V, se observó que el haz de iones se dispersó más del 1 % como se registró en la Ecuación (4.5). Éste llegó a la placa de detección, pero hubo problemas al reconocer las mediciones, no se pudieron registrar los datos en el multímetro debido a que las mediciones eran muy pequeñas y los valores no se registraban en él. Asimismo, emitía un color tenue, ya que no había suficientes partículas. La dispersión del haz se debe al choque entre iones del mismo signo y esto provoca que existan fuerzas de repulsión y se alejen del eje central del mismo.



Figura 4.17: Fuente de iones conectada a los equipos correspondientes para generar y acelerar las partículas, con la finalidad de detectarlos en el amperímetro.

Para solucionar esta desviación, se anexó un solenoide pequeño en la segunda cámara para enfocar el haz y agrupar los iones. Se diseñó con un cable de cobre de calibre 12 (AWG 12), que tiene un diámetro ( $\phi$ ) de 2 mm y soporta una corriente máxima de 25 A. Se decidió que la longitud sea la mitad de la longitud de la segunda cámara, ( $L_s = 67$  mm), esto es con el objetivo de que el campo magnético sea constante en él y se pueda enfocar la trayectoria. Entonces tomando en cuenta el diámetro del cable, el número de vueltas se obtiene como:

$$N = \frac{L_s}{\phi} = \frac{67 \text{ mm}}{2 \text{ mm}} \approx 34 \quad (4.9)$$

Se suministró 5 A, con el objetivo de tener un buen enfoque y se pueda observar los iones agrupados en la trayectoria. El campo magnético del solenoide es constante y uniforme, de acuerdo a la siguiente expresión [77]:

$$B = \mu_0 n I \approx 6,4 \mu T \quad (4.10)$$

Considerando a  $n = N/L_s$  y  $\mu_0$  como la permeabilidad magnética en el vacío, cuyo valor es  $4\pi \times 10^{-7} T \cdot m \cdot A^{-1}$ . Se aseguró con cinta adhesiva la forma del solenoide, con el fin de que exista la mínima distancia entre cada vuelta.

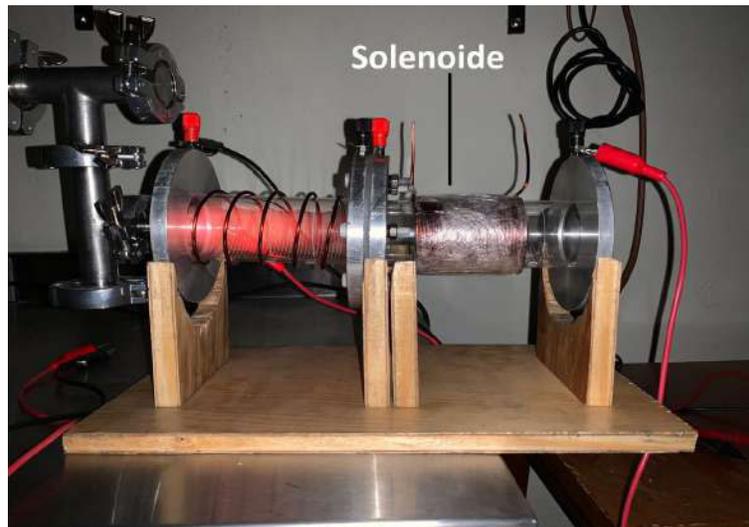


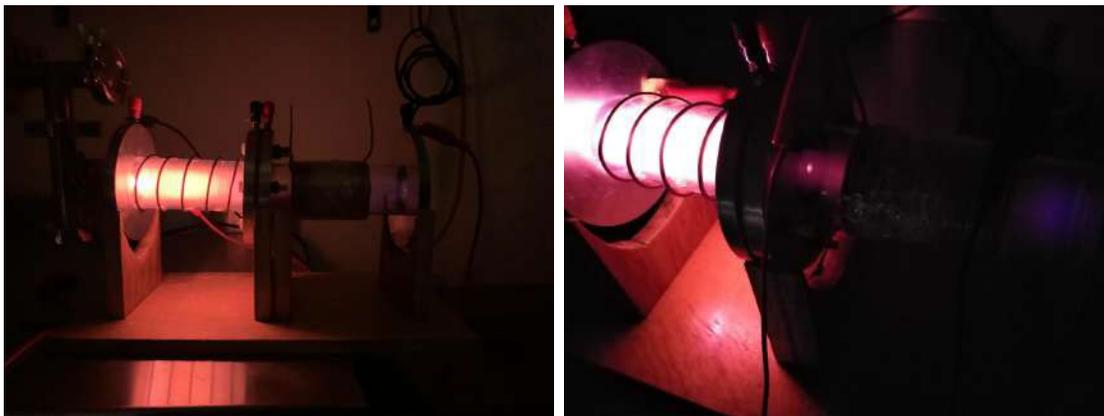
Figura 4.18: Solenoide incrustado en el sistema de extracción con la finalidad de converger el haz y disminuir la dispersión del mismo.

Para suministrar corriente al solenoide, se utilizó una fuente de voltaje Steren, Modelo FB-2040. En la Figura 4.19, se muestra el sistema general de la fuente de iones con el solenoide y las conexiones con los equipos. La conexión del dispositivo se realiza cuando todos los equipos están apagados, para mayor seguridad. Se procedió a probar el dispositivo con el solenoide a 5 W de potencia en el reactor de plasma y con un voltaje de extracción de hasta 5 kV, en pasos de 1 kV, ya que en este rango se observaba definido la trayectoria de las partículas.



Figura 4.19: Sistema general de la fuente de iones.

En las siguientes imágenes, se presentan los resultados.



(a) Solenoide sin conectar

(b) Solenoide conectado a 5 A

Figura 4.20: Haz de iones. (a) La dispersión se notó claramente, por lo que no se pudo obtener registros de las cantidades de corriente que llegaban a la placa detectora. (b) Se mostró una mejoría, el haz se definió y pudo converger en el sistema de detección.

De acuerdo a la Figura 4.20, el haz es más intenso y se observa la trayectoria de los iones cuando el solenoide está conectado, al pasarlo, éste se dispersa como consecuencia de la fuerza de repulsión entre las partículas [78].

Ahora bien, de acuerdo a la ecuación de Child-Langmuir (Ec. 2.37), a medida que se aumenta el valor del voltaje de extracción, aumenta el valor de la cantidad de corriente detectada, esta relación se muestra en la siguiente tabla:

Si se grafica los valores obtenidos en la Tabla 4.5, se obtiene como resultado la

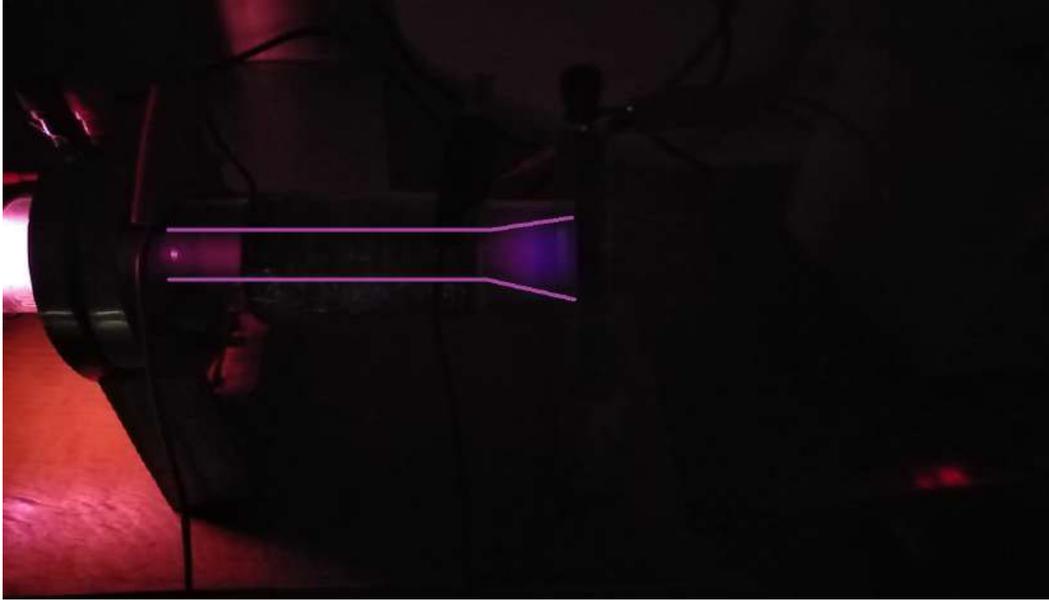


Figura 4.21: Trayectoria de los iones en el sistema de extracción y detección, se observó que al pasar las partículas por el solenoide, éstas se enfocan y forman un haz bien definido, cuya intensidad de corriente se registró en el amperímetro.

Registro a 5 W	
Voltaje (kV)	Corriente ( $\mu\text{A}$ )
1	165
2	410
3	750
4	1223
5	1845

Tabla 4.5: Valores registrados.

Figura 4.10, con valores entre 1 kV hasta 5 kV. Por lo tanto, se demuestra la relación entre la teoría y el experimento.

La potencia en el reactor de plasma no se aumentó, como se sabe, a medida que aumenta la potencia, la producción de iones es mayor y por ende, la energía del haz [79]. Esto significa que habría mayor radiación ionizante en el ambiente [80]. La dosis absorbida que emite este dispositivo se puede obtener con un dosímetro que registre los valores a diferentes distancias [81], no se realizó en este proyecto, pero se puede considerar como investigación futura para mejorar el prototipo.

Además, la relación carga-masa se puede obtener fácilmente con un espectrómetro de masas y de ahí, conocer el porcentaje de iones de nitrógeno presente en el

plasma [82]. Sin embargo, existe otra manera de conocer este valor, y es usando un campo magnético constante y uniforme que pueda desviar el haz de iones, al alterar la trayectoria, se puede conocer la velocidad de éste, y por lo tanto la energía que porta [83].

Para este caso, se pudo haber usado las bobinas de Helmholtz pero el haz de iones se encuentra dispersado sin el solenoide [84]. Al tener el solenoide, se puede obtener una trayectoria definida pero no es suficiente y el grado de dificultad aumenta para medir la relación carga-masa [85]. Por lo tanto, la fuente de iones simple que se presenta puede estar totalmente caracterizada, teniendo en cuenta estos puntos, y con ello, se pueden obtener mejoras en el dispositivo [86–89].

# Capítulo 5

## Conclusión

Se construyó una fuente de iones simplificando los sistemas de producción y aceleración de iones. Asimismo, se emplearon materiales no costosos como: aluminio, vidrio de borosilicato, cable de cobre esmaltado, entre otros. Por lo que, se logró obtener un dispositivo más accesible que sus homólogos en las industrias. El desarrollo de las ecuaciones permitió conocer los efectos electromagnéticos necesarios para poder realizar la caracterización del prototipo por medio de simulaciones. El plasma se obtuvo a partir de condiciones específicas y con equipos adecuados: vacío, campo magnético y gas a ionizar. Sin éste, no se podría haber obtenido los iones, aunque existen otras formas de producción, sin embargo, el reactor de plasma era la mejor opción y la originalidad en este proyecto.

Los datos obtenidos en la simulación fueron corroborados con las pruebas del dispositivo. Como es el caso del campo magnético generado para producir el plasma, la ecuación de Child-Langmuir que relaciona el voltaje aplicado y la detección de la intensidad de corriente ligado a los iones, así como la densidad de iones a medida que se aumentaba la potencia del generador RF. Mediante la simulación física se logró analizar la naturaleza del plasma, la densidad de flujo magnético, la densidad de iones del aire y el campo magnético del reactor, asimismo, se observó la trayectoria que seguirían los iones al salir de éste, y la corriente que detectaba la placa final debido a los iones que chocaban contra ella. El tipo de reactor utilizado para producir el plasma fue el inductivo, cuya potencia suministrada para generar los iones en él se

facilitaba a diferencia del reactor capacitivo, también, la densidad de iones por metro cúbico en la cámara era mayor en el ICP que en el CCP. Los principales parámetros en la construcción de una fuente de iones son: la naturaleza del plasma, y la forma en que se extraen los iones. Diseñar, simular los procesos y la dependencia de los parámetros involucrados ayuda en la generación de un esquema experimental optimizado. En México el estudio sobre esta línea es aún emergente, por lo que se pretende explorar y trabajar como pioneros en este campo. Hablando con objetividad, existe aún mucho trabajo futuro por hacer, pero se lleva un buen comienzo y con la finalidad de aportar en el ámbito científico y como beneficio de México.

# Bibliografía

- [1] J. J. Thomson. "Cathode Rays". *Philosophical Magazine*, **44**(293), (1897).
- [2] E. Wilson. *An Introduction To Particle Accelerators*. British Library. Oxford University Press, 2001.
- [3] M. S. Livingston and J. P. Blewett. *Particle Accelerators*. New York:. McGraw-Hill, 1969.
- [4] R. W. Hamm and M. E. Hamm. *Industrial Accelerators and Their Applications*. World Scientific, 2012.
- [5] H. Wiedemann. *Particle Accelerator Physics*. Springer. Springer International Publishing Switzerland, 2015.
- [6] W. Chao, K. Mess, M. Tigner, and F. Zimmermann. *Handbook of Accelerator Physics and Engineering*. World Scientific (Firm). World Scientific, 2nd edition, 2013.
- [7] J. D. Cockcroft and E. T. S. Walton. "Experiments with High Velocity Positive Ions. (1) Further Developments in the Method of Obtaining High Velocity Positive Ions". *Proceedings of the Royal Society*, **A**(136):pp. 619–630, (1932).
- [8] M. D. Church and J. P. Marriner. "The Antiproton Sources: Design and Operation". *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, **43**(1):pp. 253–295, (1993).

- [9] L. G. Vintzenko and S. V. Grigoriev et al. "Hollow-Cathode Low-Pressure Arc Discharges and Their Application in Plasma Generators and Charged-Particle Sources". *Russian Physics Journal*, **44**:pp. 927–936, (2001).
- [10] B. Window and N. Savvides. "Charged particle fluxes from planar magnetron sputtering sources". *Journal of Vacuum Science and Technology A*, **4**:pp. 196, (1986).
- [11] S. V. Bulanov, T. Z. Esirkepov, V. S Khoroshkov, A. V. Kuznetsov, and F. Pegoraro. "Oncological hadrontherapy with laser ion accelerators". *Physics Letters A*, **299**:pp. 240–247, (2002).
- [12] R. Orecchia, A. Zurlo, A. Loasses, M. Krenqli, G. Tosi, S. Zurrida, P. Zucali, and U. Veronesi. "Particle beam therapy (hadrontherapy): basis for interest and clinical experience". *European Journal of Cancer*, **34**:pp. 459–468, (1998).
- [13] B. Wolf. *Handbook of Ion Sources*. Ilustrada. CRC Press, 1995.
- [14] H. Conrads and M. Schmidt. "Plasma generation and plasma sources". *Plasma Sources Science and Technology*, **9**:pp. 441–454, (2000).
- [15] D. A. Gurnett and A. Bhattacharjee. *Introduction to Plasma Physics: With Space and Laboratory Applications*. Cambridge University Press, 2005.
- [16] A. Fridman. *Plasma Chemistry*. Cambridge. Cambridge University Press, 2008.
- [17] Q. Z. Luo, N. D'Angelo, and R. L. Merlino. "Shock formation in a negative ion plasma". *Physics of Plasma*, **5**(8):pp. 2868–2870, (1998).
- [18] U. Amaldi et al. "Accelerators for hadrontherapy: From Lawrence cyclotrons to linacs". *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **620**:pp. 563–577, (2010).
- [19] P. A. Miller, J. W. Poukey, and T. P. Wright. Electron beam generation in plasma-filled diodes. *Phys. Rev. Lett.*, **35**:940–943, 1975.

- [20] V. Kurnaev, I. Vizgalov, K. Gutorov, T. Tulenbergenov, I. Sokolov, A. Koldeshnikov, V. Ignashev, V. Zuev, I. Bogomolova, and N. Klimov. Investigation of plasma–surface interaction at plasma beam facilities. *Journal of Nuclear Materials*, 463:228 – 232, 2015.
- [21] Michael Thompson. *Handbook of Inductively Coupled Plasma Spectrometry: Second Edition*. Springer Science and Business Media, 2012.
- [22] A. Piel. *Plasma Physics*. Springer. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [23] J. R. Roth. *Industrial Plasma Engineering*. Institute of Physics Publishing. CRC Press, 1995.
- [24] A. Anders. ”Tracking down the origin of arc plasma Science-II. Early continuous discharges”. *Plasma Science, IEEE Transactions on*, **31**:pp. 1060–1069, (2003).
- [25] M. Faraday. *Experimental Researches in Electricity*. Dover Publications, 1839.
- [26] W. Crookes. ”On Radiant Matter. Lecture delivered before the British Association for the Advancement of Science”. *The Popular Science Monthly*, **16**, (1880).
- [27] F. F. Chen. *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*. Springer US, 1984.
- [28] J. Scheirs. *Historical Overview of Styrenic Polymers*. Modern Styrenic Polymers, 2003.
- [29] S. G. Brenes. ”Plasma: Energía para el futuro...”. *Investiga.TEC*, **19**:pp.6, (2014).
- [30] E. Speth, M. Ciric, J. H. Feist, P. Frank, B. Heinemann, W. Kraus, F. Probst, R. Riedl, R. Trainham, O. Vollmer, and R. Wilhelm. ”Rf ion sources for fusion applications: design, development and performances”. *Fusion Engineering and Design*, **46**:pp. 383–388, (1999).

- [31] F. Gordillo. "Plasma Fríos". *Investigación y Ciencia*, **381**:pp. 70–79, (2008).
- [32] M. Laroussi and T. Akan. *Arc-Free Atmospheric Pressure Cold Plasma Jets: A Review*. Plasma Processes and Polymers, 2007.
- [33] U. Kogelschatz. "Dielectric-Barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications". *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, **23**:pp. 1–46, (2003).
- [34] A. Fridman. *Plasma Chemistry*. Cambridge University Press, 2008.
- [35] J. Meichsner. *Nonthermal Reactive Plasmas*. Springer, 2010.
- [36] M. Bonitz et al. *Introduction to Complex Plasma. Chapter 2, 17-39: Principles of Transport in Multicomponent Plasmas*. Springer, 2010.
- [37] Denis J. Evans and Gary Morriss. *Statistical Mechanics of Nonequilibrium Liquids*. Cambridge University Press; Edición: 2, 2008.
- [38] S.G Jennings. The mean free path in air. *Journal of Aerosol Science*, 19(2):159 – 166, 1988.
- [39] Raymond A. Serway. *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*. Saunders College, 1990.
- [40] Phillip C. Clemmow. *Electrodynamics Of Particles And Plasmas*. CRC Press, 2018.
- [41] Eric Stern et al. Importance of the debye screening length on nanowire field effect transistor sensors. *Nano Letters*, 7(11):3405–3409, 2007.
- [42] J. A. Bittencourt. *Fundamentals of Plasma Physics*. Springer Science and Business Media, 2013.
- [43] P. A. Sturrock. *Plasma physics: an introduction to the theory of astrophysical, geophysical, and laboratory plasmas*. Cambridge University Press, 1994.

- [44] Ya. B. Zel'dovich and Yu. P. Raizer. *Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena*. Academic Press, 1966.
- [45] S. Rothe, A. N. Andreyev, and K. D. A. Wendt. "Measurement of the first ionization potential of astatine by laser ionization spectroscopy". *Nature Communications*, 4(1835), (2013).
- [46] Creative Commons Atribución 3.0 Unported. *Graph of ionization energy vs. atomic number*. Basado en: Erste Ionisierungsenergie PSE color coded.png de Sponk, 2013.
- [47] Harold R. Kaufman and Raymond S. Robinson. Ion source design for industrial applications. *AIAA Journal*, 20(6):745–760, 1982.
- [48] R.J. Conzemius and J.M. Capellen. A review of the applications to solids of the laser ion source in mass spectrometry. *International Journal of Mass Spectrometry and Ion Physics*, 34(3):197 – 271, 1980.
- [49] H. R. Kaufman, J. J. Cuomo, and J. M. E. Harper. Technology and applications of broad-beam ion sources used in sputtering. part i. ion source technology. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 21(3):725–736, 1982.
- [50] L. Serafini. *Particle Sources*. Introduction to Accelerator Physics Course. Baden bei Wien, Austria, (2004).
- [51] J. M. Miranda, J. Sebastian, M. Sierra, and J. Margineda. *Ingeniería de Microondas: Técnicas Experimentales*. Prentice Práctica Series. Prentice Hall, 2002.
- [52] R. Feynman. *Lectures on Physics 2: Mainly Electromagnetic and Matter*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. Addison-Wesley, 1964.
- [53] I. H. Hutchinson. Principles of plasma diagnostics: Second edition. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 44(12):2603–2603, 2002.
- [54] David J. Griffiths. *Introduction to Electrodynamics*. Cambridge University Press; Edición: 4th Revised ed., 2017.

- [55] J. Park, I. Henins, H. W. Herrmann, S. G. Selwyn, and R. F. Hicks. "Discharge phenomena of an atmospheric pressure radio-frequency capacitive plasma source". *Journal of Applied Physics*, **80**(1):pp. 20–28, (2001).
- [56] G. Aston and P. J. Wilbur. "Ion extraction from a plasma". *Journal of Applied Physics*, **52**(4):pp. 2614–2626, (1981).
- [57] D. Halliday, R. Resnick, and K. S. Krane. *Física Vol. 2*. Compañía Editorial Continental, S. A. de C. V., 1999.
- [58] K. Budnik and W. Machczyński. "Magnetic field of complex helical conductors". *Archives of Electrical Engineering*, **62**(4):pp. 533–540, (2013).
- [59] Y. Y. Lau Lau. Simple theory for the two-dimensional child-langmuir law. *Phys. Rev. Lett.*, 87:278301, 2001.
- [60] John R. Reitz and F. J. Milford. *Fundamentos de la Teoría Electromagnética*. Alhambra Mexicana, S.A., 2001.
- [61] C.D. Child. "Discharge from hot CaO". *Phys. Rev. (Series I)*, **32**(5):pp. 492–511, (1911).
- [62] J. J. Thomson. *Conduction of Electricity Through Gases*. Gerstein-University of Toronto. Cambridge University Press, 1906.
- [63] Harold R. Kaufman. Broad-beam ion sources: Present status and future directions. *Journal of Vacuum Science and Technology A*, 4(3):764–771, 1986.
- [64] M. Jesús Pascual, Luis Pascual, and Alicia Durán. *Vidrios y vitrocerámicos para soldadura: Usos tradicionales y nuevas áreas de aplicación*. Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 1997.
- [65] S. Errede. *American Wire Gauge (AWG) and Metric Gauge Wire Sizes. Supplemental Handout Department of Physics*. University of Illinois Urbana-Champaign, 2015.

- [66] R. Hagel, L. Gong, and R. Unbehauen. "On the magnetic field of an infinitely long helical line current". *IEEE Transactions on Magnetics*, **30**(1):pp. 80–84, (1994).
- [67] R. C. Brandt and R. I. Martens. "Shattering Glass Cookware". *American Ceramics Society Bulletin*, (2012).
- [68] J. Dawson. Plasma particle accelerators. *Scientific American*, 260(3):54–61, 1989.
- [69] A. A. Kulikovskiy. "Positive streamer between parallel plate electrodes in a atmospheric pressure air". *Journal of Physics D: Applied Physics*, **30**(3):pp. 441–450, (1997).
- [70] Leonardo G. Cohen et al. Effects of coil design on delivery of focal magnetic stimulation. technical considerations. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 75(4):350–357, 1990.
- [71] Tamer Ibrahim et al. Effect of rf coil excitation on field inhomogeneity at ultra high fields: a field optimized tem resonator. *Magnetic Resonance Imaging*, 19(10):1339 – 1347, 2001.
- [72] N. A. Haleem, M. M. Abdelrahmman, and M. S. Ragheb. "Extraction of ions and electrons from audio frequency plasma source". *AIP Advances*, **6**(9):pp. 095028–1–095028–9, (2016).
- [73] G. Y. Yushkov, A. Anders, E. M. Oaks, and I. G. Brown. "Ion velocities in vacuum arc plasmas". *Journal of Applied Physics*, **88**(10):pp. 5618–5622, (2000).
- [74] S. J. Ling, J. Sanny, and B. Moebis. *Electric Potential and Potential Difference*. OpenStax University Physics, 2013.
- [75] U. Kaldor and S. Wilson. *Theoretical Chemistry and Physics of Heavy and Superheavy Elements*. Kluwer Academic Publishers, 2003.

- [76] J. F. Waymouth. *Electric Discharge Lamps*. Alexander Kusko Series Editor. MIT Press, Cambridge, Mass, 1971.
- [77] E. M. Purcell. *Electricidad y Magnetismo*. Reverté, 1988.
- [78] K. Harres et al. Beam collimation and transport of quasineutral laser-accelerated protons by a solenoid field. *AIP: Physics of Plasmas*, 17(2):023107, 2010.
- [79] P. Deichuli et al. Low energy, high power hydrogen neutral beam for plasma heating. *Review of Scientific Instruments*, 86(11):113509, 2015.
- [80] E. Antončík, G. Di Cola, and L. Farese. Radiation-ionization energy and fano factor in semiconductors. i. *Radiation Effects*, 5(1):1–13, 1970.
- [81] Kenneth Kase. *The Dosimetry of Ionizing Radiation*. Elsevier, 2012.
- [82] Raymond E. Kaiser et al. Operation of a quadrupole ion trap mass spectrometer to achieve high mass/charge ratios. *International Journal of Mass Spectrometry and Ion Processes*, 106(1):79–115, 1991.
- [83] R. K. Cacak and J. R. Craig. Magnetic field uniformity around near-helmholtz coil configurations. *Review of Scientific Instruments*, 40(11):1468–1470, 1969.
- [84] W. Franzen. Generation of uniform magnetic fields by means of air-core coils. *Review of Scientific Instruments*, 33(9):933–938, 1962.
- [85] C. Engström et al. Design, plasma studies, and ion assisted thin film growth in an unbalanced dual target magnetron sputtering system with a solenoid coil. *Vacuum*, 56(2):107–113, 2000.
- [86] A. T. Forrester. *Large ion beams: Fundamentals of generation and propagation*. Wiley-Interscience, 1988.
- [87] R. Middleton. A review of ion sources for accelerator mass spectrometer. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 5(2):193–199, 1984.

- [88] D. P. Moehs, J. Peters, and J. Sherman. Negative hydrogen ion sources for accelerators. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 33(6):1786–17989, 2005.
- [89] H. Daido, M. Nishiuchi, and A. S. Pirozhkov. Review of laser-driven ion sources and their applications. *Reports on Progress in Physics*, 75(5):056401, 2012.



León, Guanajuato, 17 de noviembre de 2020

Dr. David Yves Ghislain Delepine  
Director División de Ciencias e Ingenierías  
Campus León

PRESENTE:

Por medio de este documento hago constar que una vez revisado el trabajo de Tesis titulado: “Diseño y construcción de una fuente de iones por medio de un reactor de plasma”, que presenta el Lic. Arón Hernández Trinidad para obtener el grado de Maestro en Ciencias Aplicadas, lo encuentro satisfactorio y considero que cumple con los criterios de originalidad y calidad que exige nuestra institución, por lo que avalo se realice la defensa pública de esta tesis, para obtener el grado mencionado.

Atentamente  
“La verdad os hará libres”

Una firma manuscrita en tinta azul que parece ser la del Dr. Carlos Villaseñor Mora.

Dr. Carlos Villaseñor Mora  
Profesor – Investigador Titular A



León, Guanajuato a 23 de noviembre de 2020

**Asunto:** Visto bueno para defensa de tesis

**DR. DAVID YVES GHISLAIN DELEPINE**  
**DIRECTOR**  
**DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍAS**  
**CAMPUS LEÓN**  
**P R E S E N T E**

Por medio de la presente, le informo que he leído y revisado la tesis titulada "***Diseño y construcción de una fuente de iones por medio de un reactor de plasma***" mismo que ha elaborado el **Lic. Arón Hernández Trinidad** para obtener el grado de **Maestro en Ciencias Aplicadas**. Doy fe que este trabajo reúne todas las cualidades pertinentes para aspirar al grado, en cuanto a calidad y forma. Así mismo, el estudiante ha realizado las correcciones que le he formulado y por lo tanto no tengo inconveniente alguno para que programe su defensa la fecha que más le parezca conveniente.

Sin más por el momento me despido cordialmente,

Atentamente,

Dra. Maribel Juárez Hernández  
Sinodal  
Investigadora Asociada C  
Centro de Investigaciones en Óptica A.C.



León, Guanajuato, 3 de diciembre de 2020

**Dr. David Yves Ghislain Delepine**  
**Director División de Ciencias e Ingenierías Campus León**

**PRESENTE:**

Por medio de la presente, hago constar que una vez revisado el trabajo de Tesis titulado: "Diseño y construcción de una fuente de iones por medio de un reactor de plasma", presentado por el Lic. Arón Hernández Trinidad para obtener el grado de Maestro en Ciencias Aplicadas, el cual es satisfactorio y considero que cumple con los criterios de originalidad y calidad que exige nuestra institución, por lo que avalo se realice la defensa pública de esta tesis, para obtener el grado mencionado.

Atentamente:



---

Dra. María Guadalupe Neira Velázquez  
Investigador Titular "C"  
Depto. de Síntesis de Polímeros  
CIQA

