

Diseño de una fuente de iones por medio de un reactor de plasma

Arón Hernández Trinidad,
Geoffrey Humberto Israel Maury Cuna,
División de Ciencias e Ingenierías, Dpto. de Física,
Universidad de Guanajuato, León, Gto., México

Maria Concepción García Castañeda^B
CONACyT – Universidad de Guanajuato, León, Gto., México
israel.maury@ugto.mx

RESUMEN

Las fuentes de iones tienen muchas aplicaciones en la industria, la medicina y la ciencia, particularmente en los aceleradores de partículas. En este trabajo, se reporta el diseño, mecánico y electromagnético, de un diseño de una fuente de iones a partir de un reactor de plasma. El diseño consta de tres cámaras, en la primera se producen iones dando lugar a la generación de un plasma. Posteriormente, está la cámara de extracción, conformada por un electrodo con potencial negativo que produce un campo electrostático que acelera los iones positivos que se encuentran dentro del plasma. Finalmente, la cámara de detección, donde una placa con la que se cuentan los iones que chocan con ella. Para el diseño mecánico de la fuente de iones se utilizó el software Inventor Autodesk y la simulación del campo electromagnético de RF fue mediante el software COMSOL Multiphysics®.

PALABRAS CLAVE

Iones, reactor, plasma, radiofrecuencia.

ABSTRACT

Ion sources have many applications in industry, medicine and science, particularly in particle accelerators. In this work, the design, mechanical and electromagnetic, of a design of an ion source from a plasma reactor. is reported. The design consists of three chambers, in the first they produce ions resulting in the generation of a plasma. Subsequently, there is the extraction chamber, formed by an electrode with negative potential that produces an electrostatic field that accelerates the positive ions inside the plasma. Finally, the detection chamber, where a plate with which the ions that collide with it are counted. The Inventor Autodesk software was used for the mechanical design of the ion source. The simulation of the RF electromagnetic field were performed with COMSOL Multiphysics® software.

KEYWORDS

Ions, reactor, plasma, radiofrequency.

INTRODUCCIÓN

Una fuente de iones es un dispositivo que produce un haz de partículas cargadas eléctricamente, consistente de iones. Hoy en día, el uso de fuente de iones es muy importante en términos de aplicaciones, en campos como la radiobiología, la medicina, zonas espaciales y en los aceleradores de partículas. Esencialmente, la fuente es un generador de plasma equipado con un conjunto de rejillas que permiten extraer los iones. Existen diversos componentes que integran a tal dispositivo como: una cámara de descarga donde se produce el plasma, un conjunto de rejillas cargadas eléctricamente, y un neutralizador, entre otros.

En los aceleradores de partículas, la tecnología para crear la fuente de iones dependerá fuertemente del tipo de partícula que se pretende generar: electrones, protones o iones pesados; partículas con mayor masa que el electrón o protón. Es sabido que los aceleradores incrementan la energía de partículas cargadas y las confinan en haces bien definidos. Los iones producidos en la fuente, tienen usos diferentes dependiendo de la aplicación que se le quiera dar. Por ejemplo, en la radioterapia se hace uso de aceleradores lineales como fuentes de rayos X, los cuales pueden afectar los tejidos sanos colindantes donde se encuentra el daño. Los haces de iones, en cambio, tienen la característica de depositar su energía en un punto específico sin dañar algún tejido sano colindante. Efectivamente, dicha tecnología es de un alto costo, pero los beneficios en la salud del ser humano son notables.

En México, el desarrollo de este tipo de dispositivos representa un área de oportunidad para contribuir con el crecimiento científico y tecnológico del país. Lo que pretende este trabajo, es dar a conocer de una manera sencilla y simple, la creación de una fuente de iones como instrumento básico en experimentos prácticos que beneficien a la ciencia en México.

MARCO TEÓRICO

El estudio del plasma data del siglo XIX, cuando Humphry Davy desarrolló la descarga de arco eléctrico en estado estable usando corriente directa. 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.¹ En 1879, William Crookes identificó esta sustancia y la definió como el cuarto estado de la materia.² Sin embargo, el término plasma fue introducido por el físico inglés Irving Langmuir en 1928, quien lo describió como un gas ionizado. En la actualidad, el plasma está definido como un gas parcialmente ionizado que se encuentra compuesto por una mezcla de electrones, fotones, iones, átomos, neutrones y radiación electromagnética con una cuasi-neutralidad eléctrica y sensibilidad a campos magnéticos y eléctricos.³ La ionización puede producirse por otros métodos: la fuerza del campo electromagnético o por medio de un generador de microondas que es acompañado por la disociación molecular.⁴

Una de las primeras aplicaciones del plasma fue en 1960, en la polimerización de estireno a partir de monómeros introducidos en una cámara donde se generaba el plasma. En el siglo XX, el plasma se usó en la fusión nuclear con fines militares; pero hoy en día se utiliza para generar energía eléctrica, donde los átomos de hidrogeno son ionizados para generar el plasma, y este es sometido a fuertes campos magnéticos al punto de que se forme helio, de este modo se liberan

grandes cantidades de energía, sin embargo esta no es la única aplicación que tiene el plasma también se utiliza en recubrimientos de materiales, la propulsión por plasma, el generador magneto hidrodinámico, y como fuente de iones, por mencionar algunas.⁵

En el caso de los aceleradores de partículas, las fuentes de iones requieren una región de producción de plasma y de extracción de iones. La condición del plasma y la producción del ion resultante se ven afectadas por los diferentes procesos que se utilizan en la generación del plasma: el calentamiento de las partículas, el confinamiento del plasma, las colisiones, entre otras. Además, se tiene presente la ingeniería del dispositivo como los efectos térmicos sobre los ánodos, cátodos y trampas de iones de la fuente. También, se considera la erosión del material dentro del dispositivo. Con todas estas consideraciones se logra una confiable y estable producción de haz de partículas (iones) que minimice el consumo de energía en la fuente.⁶

Fuente de Iones

La fuente de iones es el dispositivo que se encarga de inyectar iones de diferentes elementos a un acelerador de partículas, cada ion tiene diferentes usos en la medicina, como recubrimientos para mejorar la biocompatibilidad de los materiales, radioterapia por protones o iones pesados, diagnósticos por radioisótopos y la producción de radiofármacos.

Existen dos tipos de plasma: caliente y frío. Este último se caracteriza por la temperatura de sus partículas pesadas (partículas con mayor masa como helio, carbono u otros iones; a diferencia de los protones y electrones) cercana a la temperatura ambiente de 25° a 100°C.⁷ Una de las formas de obtener este estado de la materia (plasma frío), es por medio de un reactor de plasmas por inducción electromagnética. El plasma es producido por medio de una bobina que se encuentra enrollada en el exterior de la cámara que contiene el gas a ionizar.⁸ Esta bobina crea un campo magnético, según la Ley de inducción de Faraday, que expresa la inducción de un campo eléctrico cuando un campo magnético varía con en el tiempo. De este modo lograremos un movimiento de electrones en el interior de la cámara y se lograra la ionización del gas.⁹ A este dispositivo, se le conoce como reactor de plasma de tipo inductivo. Sin embargo, no es la única forma de generar plasma, otro dispositivo idéntico es el reactor de plasma de tipo capacitivo que hace uso de un campo eléctrico o de radiofrecuencia para generar la ionización del gas. Si bien, un ejemplo de éste es el duo-plasmatrón, un dispositivo donde existen dos regiones: una para formar el plasma y otra para la extracción de iones. Por medio de un cátodo y un ánodo existirá una diferencia de potencial y debido a ello, los electrones y los iones positivos serán separados, pudiendo seleccionar la especie de iones según su requerimiento y depositarlos en otra cámara.

En el caso de México, ha habido un avance limitado en el diseño y construcción de los aceleradores de partículas.¹⁰ Sin embargo, esto representa una oportunidad para consolidar y trabajar en esta área, con el propósito de beneficiar al país.

En este trabajo, se pretende realizar la configuración más simple, de una cámara de descarga donde se producirá el plasma. El método consiste en producir iones en la cámara sometiendo a un gas (argón, helio, entre otros), a un campo de radiofrecuencia (RF). Posteriormente, un electrodo con potencial negativo acelerará

los iones presentes y los conducirá a una placa que estará midiendo la corriente eléctrica, y así saber el número de iones que llegan al detector. Como se puede observar, es una forma sencilla y a la vez ingeniosa de generar un haz de iones.

Diseño de la cámara de producción de iones

Para realizar los diseños de la fuente de iones, se hizo uso del programa Inventor Professional 2019. La primera cámara, es donde se produce el plasma y se encuentra compuesta por dos placas de aluminio de 90 mm de diámetro, cada una con 10 mm de grosor y unidas con un tubo de vidrio de 50 mm de diámetro por 50 mm de largo, cada unión tiene su respectivo empaque. La placa que se localiza en el extremo izquierdo, tiene dos conexiones: brida NW16 y NW10; encargadas de controlar la entrada del gas y el vacío que se produce dentro. Se espera que el vacío sea alrededor de 10^{-2} mbar. En la figura 1, se muestra el diseño mecánico del reactor de plasma (primera cámara), se puede observar que, en su extremo derecho, tiene un orificio de la medida de una brida NW25 para la extracción de los iones (segunda cámara).

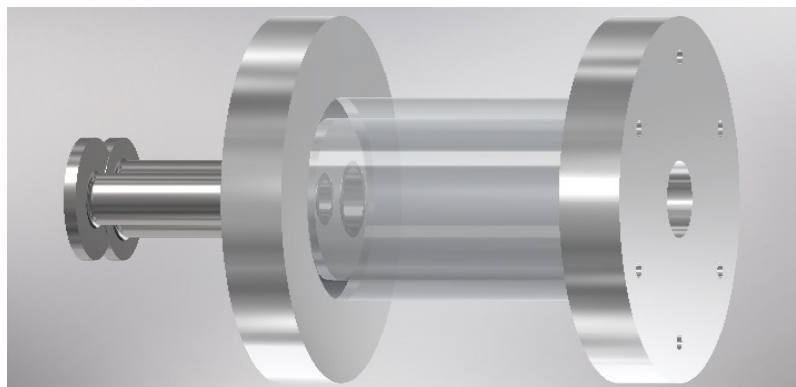


Fig. 1. Reactor de plasma con conexiones de entrada y salida.

Diseño de la cámara de extracción y detección de los iones

Esta cámara se encuentra unida mediante un tubo de vidrio, con las mismas dimensiones que se usa en el reactor de plasma. Como se muestra en la figura 2, la placa de aluminio del extremo izquierdo es el electrodo encargado de acelerar los iones, éste se conectará a una fuente de voltaje, aplicándose un potencial negativo para atraer los iones positivos.

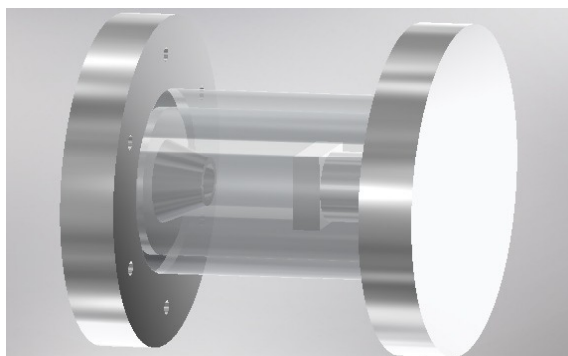


Fig. 2. Cámara de extracción y detección de iones.

El electrodo tiene una forma cónica, que ayuda a que las partículas se concentren en la región de la placa de detección. El electrodo y el reactor de plasma se unirán mediante un empaque aislante para que al ser unidas las placas no se unifican en un solo electrodo. Los pernos que se utilizan para la unión son pernos aislantes para que no se perjudique la unión.

La placa de detección tiene las mismas medidas que las placas anteriores y de igual material. En dicha placa, se encuentra un tubo que a su extremo hay una placa rectangular a la altura del orificio del cono, donde los iones que al ser acelerados forman el haz, éstos chocarán con esta placa rectangular y se detectará la corriente que pasa por la placa.

Diseño ensamblado

Al tener los componentes de la fuente de iones, se procede a ensamblar las piezas para obtener la vista completa del diseño. En la figura 3, se muestra la fuente de iones con sus piezas (cámaras) ensambladas.

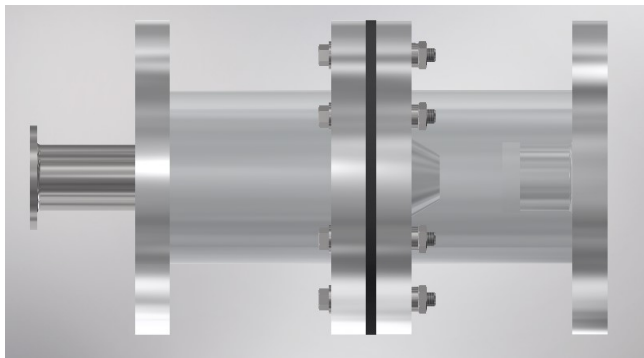


Fig. 3. Fuente de iones.

Esta forma del diseño se escogió por la facilidad de extracción de los iones, ya que la cantidad de corriente dado un voltaje aplicado está relacionado con los efectos de la carga espacial de la ecuación de Child-Langmuir:

$$P = \frac{I}{V^{3/2}} \quad (1)$$

Donde la I es la corriente total del haz de iones y V el voltaje aplicado y P es conocida como la perveancia. La perveancia es usada en haces de partículas cargadas e indica el efecto de la carga espacial sobre el movimiento del haz. Sin embargo, la ley de Child-Langmuir para aperturas redondas, la corriente de extracción de iones que puede ser extraída viene dada analíticamente de acuerdo a la siguiente expresión:

$$I = \frac{4\pi\epsilon_0}{9} S^2 \frac{2q}{m} \cdot V^{3/2} \quad (2)$$

Donde ϵ_0 es la constante dieléctrica de valor $8.8541878176 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N}\cdot\text{m}^2)$, q la carga de la partícula y m su masa. Además, S es la razón a/d , donde a es el radio de la abertura de salida y d es el espacio de extracción entre producción de iones y el electrodo de aceleración. De aquí, se obtiene la relación correspondiente:

$$P = \frac{4\epsilon_0}{9} \frac{2q}{m} \frac{A}{d^2} \quad (3)$$

Donde A es el área de emisión. Como se observa en la Ecuación (3), la distancia entre el reactor y el electrodo de aceleración debe ser pequeña para tener una salida mayor de iones. Cabe mencionar, que esta es la razón del porqué se escogió esta forma de extracción.

Simulaciones de la Fuente de Iones

Al analizar el reactor de plasma, primeramente, se simuló el potencial eléctrico y campo eléctrico que se encontraría entre las placas. Una de las placas se aterrizó, mientras que la otra se le agregó un potencial que varía con el tiempo, en la figura 4 se observan los resultados de la simulación. En la figura 5, se puede apreciar las curvas de nivel del potencial eléctrico.

La capacitancia de un capacitor de placas paralelas viene dada por la ecuación:

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \tag{4}$$

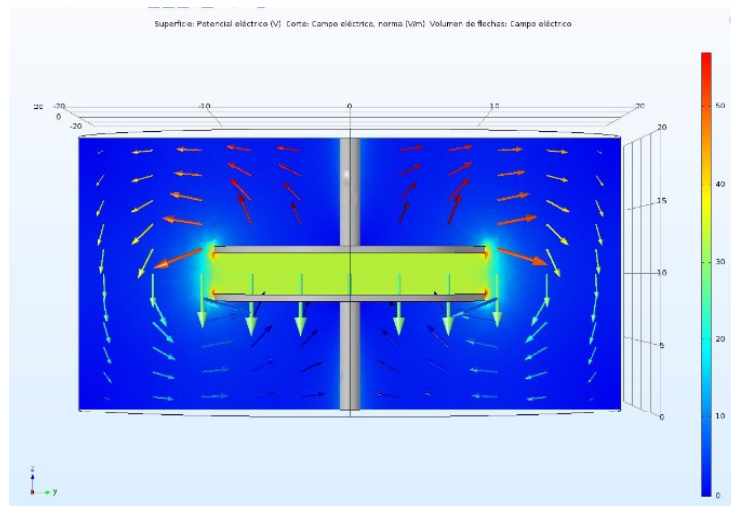


Fig. 4. Potencial eléctrico (V) y flechas del campo eléctrico.

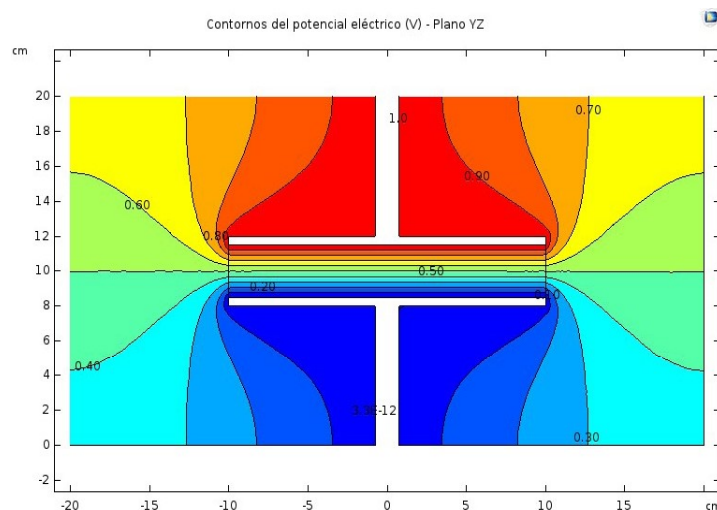


Fig. 5. Curvas de nivel del potencial eléctrico.

Donde A es el área de la placa, d la distancia entre ellas y ϵ la permitividad eléctrica absoluta. Como se observa en la Ecuación (4), a menor distancia entre las placas, mayor capacitancia y el campo eléctrico es más intenso. Es por tal motivo, se eligió que el espacio entre placas sea de 50mm. La energía eléctrica depende del voltaje y la carga, como la carga depende de la capacitancia, entonces se puede modular la energía eléctrica total, controlando estos dos parámetros. La energía eléctrica máxima total que se ha registrado es de potencia $10^{-9} J$.

Asimismo, se ha simulado la temperatura que habrá dentro del reactor que sube alrededor de 300 K con una potencia de 10 W y un vacío de 0.06 torr aproximadamente. Lo que se busca, en la siguiente cámara, es la relación que haya entre el potencial negativo y la corriente eléctrica que detectará la placa, para ello se realiza una gráfica con las características anteriores y observar la relación entre dichos parámetros, esto se presenta en la figura 6.

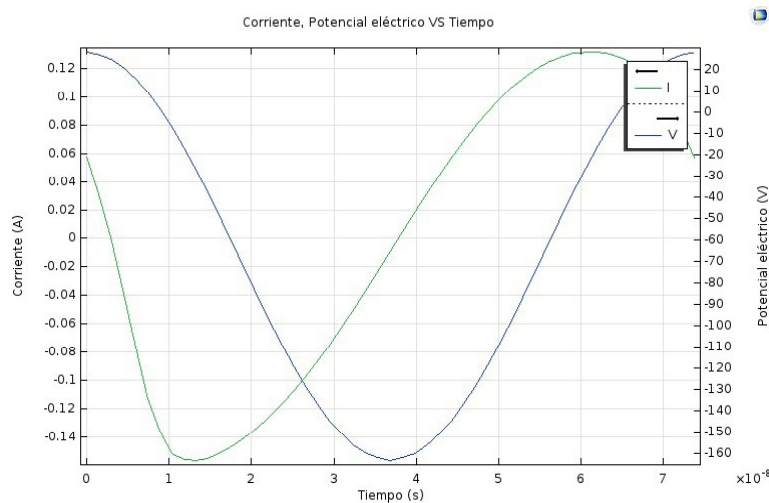


Fig. 6. Gráfica del potencial respecto a la corriente.

Es importante reconocer que la abertura de salida de los iones debe ser pequeña y puede modificarse para obtener mejores resultados, de hecho, es fundamental hacer análisis de las trayectorias de las partículas.

Posteriormente, se simuló las trayectorias de los iones en la cámara de extracción. El electrodo estuvo sometido a un potencial negativo que varía de 0 a 180 V. En la figura 7, se puede apreciar la trayectoria de las partículas en un tiempo dado. Para verificar mejor la dispersión del haz, se aumentó la distancia de la trayectoria de las partículas y en la figura 8, se observa con más detalle esta dispersión.

Además, se realizó un mapa de Poincaré para analizar el haz en tres cortes transversales, cuando sale de la cámara de generación del plasma, a la mitad de la trayectoria y por último en la placa detectora. En la figura 9, se observa puntos de color rojo, representando al haz saliendo de la primera cámara, los de color azul es a la mitad de la trayectoria y, por último, los puntos de color negro es el haz cuando llega a la placa detectora; se puede apreciar la dispersión del haz en la cámara de extracción.

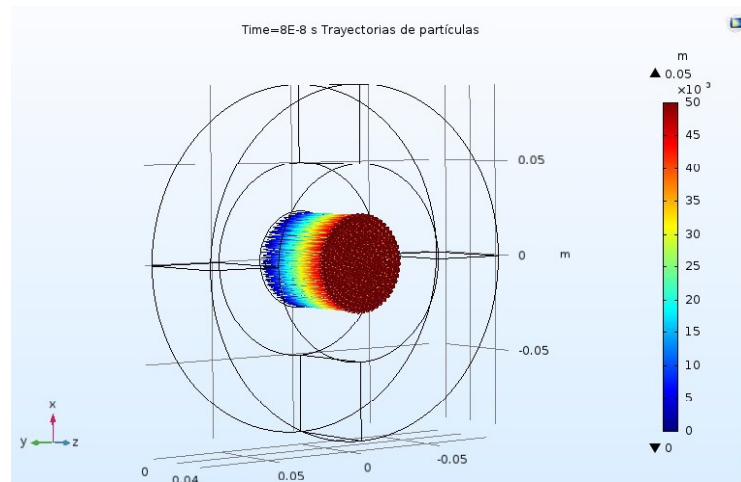


Fig. 7. Trayectoria de partículas en la cámara de extracción.

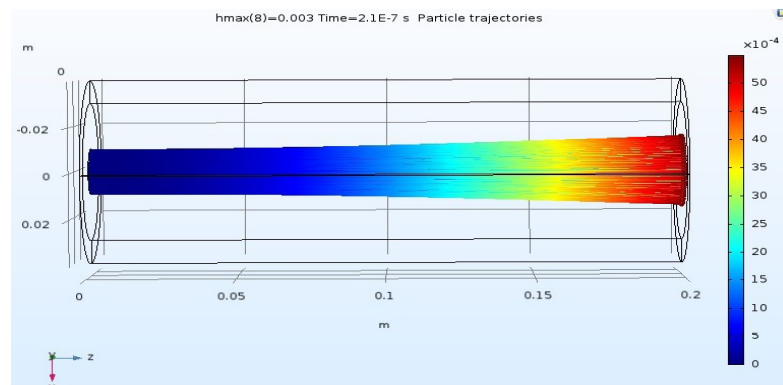


Fig. 8. Dispersión del haz a medida que avanza en el tiempo y espacio.

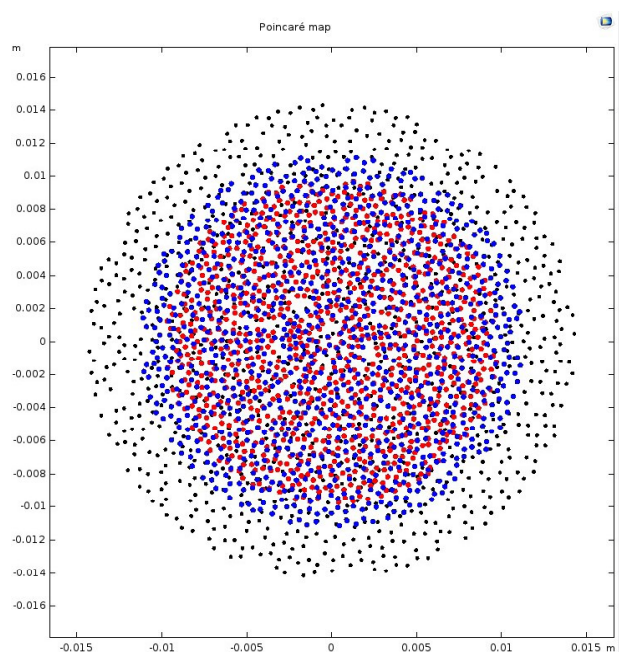


Fig. 9. Mapa de Poincaré del haz de iones.

CRITERIOS DE ACEPTACIÓN

La fuente de iones que se ha expuesto es un diseño sencillo para conocer los fundamentos básicos de su funcionalidad y el aporte que tiene a varias áreas. Esta sencilla fuente, es un trabajo pionero para que en un futuro sea modificado y mejorado, logrando así una mayor precisión.

En la Universidad de Guanajuato, se construirá un acelerador lineal de radiofrecuencia mexicano de 5 MeV con una fuente de electrones. Sin embargo, hacer uso de una fuente de iones por la extensa aplicación que existe en la industria, medicina y ciencia, es la finalidad. Por tal motivo, este trabajo es pionero en este rubro, ya que se pretende mejorar e incluso cuando se tenga su mejoramiento, ser usado en este acelerador lineal.

Este producto de investigación no solo sirve para realizar la fuente de iones, sino que el reactor de plasma puede ser usado para otros fines, es decir, tiene un valor agregado con experimentos que requieran de la generación de un plasma para llevarse a cabo. Sin lugar a duda, es un trabajo que conlleva esfuerzo, trabajo en equipo, diversas áreas de aplicación, innovación, y desarrollo de ingeniería, temas relevantes para la independencia tecnológica y científica del país.

CONCLUSIONES

Como se ha expuesto, existen varios parámetros para realizar una fuente de iones. La forma en que se produce el plasma y la forma en que se extraen los iones varía en diferentes aplicaciones, pero la forma básica que se ha presentado en este trabajo permite, mediante un diseño sencillo, generar un haz de iones que puede ser aplicado a diferentes áreas como la ingeniería, física y química, por mencionar algunas.

Diseñar, simular los procesos y la dependencia de los parámetros involucrados ayuda en la generación de un esquema experimental optimizado. Se sabe que tanto en el trabajo teórico como el experimental existen errores, pero se minimizan para lograr un diseño confiable.

En este trabajo se expuso una fuente de iones simple, que logra el objetivo de conocer los fundamentos básicos, así como la física detrás de ella. La aplicación es muy amplia, desde grabados en superficie como modificaciones a fármacos: radiofármacos. Sin lugar a duda, resulta un tema relevante en la innovación y tecnología. Sin embargo, 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.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a los asesores de este proyecto que se está realizando en la Universidad de Guanajuato, a los doctores María Concepción García Castañeda y Humberto Maury Cuna por su colaboración y estima. Asimismo, a la beca proporcionada por CONACyT durante mi estancia en la maestría y al Proyecto de Infraestructura 295720 de CONACyT. De igual manera, a mi familia y amigos; a los que están y a los que ya no.

REFERENCIAS

1. Roth J. R., *Industrial Plasma Engineering*, Institute of Physics Publishing, London, UK (1995).
2. <http://cds.cern.ch/record/398432/files/p619.pdf> (1985).
3. García M., Montero J., Marlon C., Sarmiento P., “Plasma: Una tecnología de gran potencial para la industria y la ciencia”, *Ingenius*, 1, p. 66-72 (2010).
4. Rahman A., “Ion Sources for Use in Research and Low Energy Accelerators”, *International Journal of Instrumentation Science*, 1, p. 63-77 (2012).
5. Brenes S. G., “Plasma: Energía para el futuro...”, *Investiga.TEC*, 19, p. 6 (2014).
6. <https://cds.cern.ch/record/603056/files/CERN-2006-002.pdf> (2006).
7. Gordillo F., “Plasmas Fríos”, *Investigación y Ciencia*, 381, p. 70-79 (2008)
8. Miranda J. M., Sebastián J., Sierra M., Margineda J., *Ingeniería de Microondas: Técnicas Experimentales*, Prentice Hall, Madrid, España (2002).
9. Feynman R., *Lectures on Physics 2: Mainly Electromagnetic and Matter*, Addison – Wesley Publishing Company, Inc., California, USA (1964).
10. De la Paz M., *Experiencia Mexicana en Aceleradores de Partículas: Investigación y Beneficios en la Sociedad Mexicana*, Siglo XXI Editores, Ciudad de México, México (2004).

