

# DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA FUENTE DE IONES PARA PROPÓSITOS EDUCACIONALES

Alfeo Euan, Salvatore Engelbert (1), Maury Cuna, Georfrey Humberto Israel (2)

<sup>1</sup> [Ingeniería en Biomédica, Universidad Modelo] | [engelbert410@hotmail.com]

<sup>2</sup> [Departamento de Física, División de ciencias e ingenierías, Campus León, Universidad de Guanajuato | [israel.maury@ugto.mx]

## Resumen

Una fuente de iones en una de sus aplicaciones, es el dispositivo que suministra un haz de partículas cargadas bien definidos y confinados para, posteriormente, ser acelerado. En este trabajo se diseñó y construyó una fuente de iones, a partir de la modificación de un reactor de plasma del tipo inductivo, donde una corriente alterna (AC) crea campos electromagnéticos variables en el tiempo, con la energía necesaria para disociar los átomos de helio y generar el plasma. Posteriormente, se aplicará un campo electrostático por medio de electrodos y así extraer los iones. El dispositivo se diseñó con el software CAD 3D Inventor Professional de Autodesk, tomando en cuenta los materiales a utilizar. El plasma a generar se le conoce como plasma frío, este tipo es aquel que se produce en un rango de temperatura de entre 25°C a 100°C, en su composición los electrones alcanzan varios miles de grados, pero los iones no tienen la misma temperatura. Como fuente de alimentación se utilizó una fuente variable de AC que, posteriormente, se cambió por un transformador de alto voltaje, los campos electromagnéticos que se aplicaron no fueron suficientes para generar el plasma de Helio, pero si ionizaron el gas dentro de una lámpara fluorescente.

## Abstract

An ion source in one of its applications is the device that supplies a beam of charged particles well defined and confined to be accelerated later on. In this work, an ion source was designed and constructed, from the modification of a plasma reactor inductive type, where an alternating current (AC) creates time-variable electromagnetic fields, with the energy necessary to dissociate the atoms of helium and generate the plasma. Subsequently, an electrostatic field will be applied by electrodes to extract the ions. The device was designed with CAD 3D Inventor Professional software from Autodesk, considering the materials to be used. The plasma to be generated is known as cold plasma, this type is produced within a temperature range between 25 ° C to 100 ° C, in its composition, the electrons reach several thousand degrees, but the ions do not have the same temperature. As a power source, a variable source of AC was used, which was later changed to a high-voltage transformer, the electromagnetic fields that were applied were not enough to generate the Helium plasma, but they ionized the gas inside a fluorescent lamp.

## Palabras Clave

Iones, plasma, inducción electromagnética, acelerador de partículas.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el plasma es la principal manera de obtener iones para confinarlos en haces bien definidos y acelerarlos a altas energías por medio de aceleradores de partículas. En la medicina, se emplea en el tratamiento de cáncer por medio de terapia con partículas pesadas, técnica conocida como hadronterapia. El tipo de aceleradores empleados en esta técnica tiene como uno de sus principales componentes: la fuente de iones o suministro de partículas. La fuente tiene como función generar estos haces de partículas, mediante la ionización de un gas para dar lugar a la formación de un plasma por medio de diferentes métodos. Posteriormente, las especies dentro del plasma son separadas mediante un sistema de extracción y su energía se incrementa al ser acelerados. Al final, el haz de iones (o hadrones) tiene la energía suficiente para ser empleado en el tratamiento de los pacientes.

En 1808, 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 y dio inicio al estudio del material obtenido después de dicha descarga. En 1879, William Crookes identificó esta sustancia y la definió como el cuarto estado de la materia. Sin embargo, el término plasma fue introducido por el físico inglés Iving 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 casi neutralidad eléctrica y sensibilidad a campos magnéticos y eléctricos [1].

El plasma es un estado adicional de la materia que surge de la ionización de átomos y moléculas de un gas, de ahí que sea denominado el cuarto estado de la materia. La ionización puede producirse por otros métodos como son por la fuerza del campo electromagnético o por medio de un generador de microondas que es acompañado por la disociación molecular [2].

Una de las primeras aplicaciones, del así llamado cuarto estado de la materia, fue en 1960, para producir la polimerización de estireno a partir de monómeros introducidos en una cámara donde se generaba el plasma [3]. En los años cincuenta, se usó en la fusión nuclear con fines militares; pero hoy en día se utiliza para generar energía eléctrica, donde reactores de fusión nuclear intentan imitar al sol, donde se genera plasma por medio de campos electromagnéticos para ionizar hidrógeno y este plasma es sometido a fuertes campos magnéticos para vencer la fuerza de repulsión nuclear y generar átomos de helio, en este proceso se generan grandes cantidades de energía [4].

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 mismo. Entre estos están:

- Calentamiento de electrones
- Confinación de plasma (por medio de campos eléctricos y magnéticos)
- Colisión (electrón-electrón, electrón-ion, ion-electrón, ion-ion, ion-ion + gas residual)
- Procesos atómicos (ionización, excitación, disociación, recombinación)
- Superficies físicas (revestimiento–desabsorción, emisión de electrones)

En la ingeniería de fuentes de iones, se tiene en cuenta 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 del haz de partículas (iones) que minimice el consumo de energía de alto voltaje en la fuente [2,5].

Los aceleradores de partículas son dispositivos que incrementan la energía de partículas cargadas y las confinan en haces bien definidos. Se pueden dividir en dos familias: aceleradores lineales, en estos las partículas aceleradas solo pasan por los componentes de la máquina una sola vez, y los aceleradores circulares donde las cargas recorren varias veces los componentes del acelerador hasta alcanzar la energía requerida. Las aplicaciones de estos dispositivos comprenden diversas áreas tales como la medicina, la industria y la investigación científica. En la medicina anualmente son tratados más de 10,000 millones de pacientes que luchan contra el cáncer, por medio de radiación con rayos X o con iones pesados y protones, los primeros se pueden lograr empleando únicamente aceleradores lineales únicamente con una fuente de electrones, sus dimensiones son mucho más pequeñas y de menor costo, pero los rayos X son menos eficaces que los protones o iones pesados. Para obtener estas partículas se necesita tecnología de punta así como la combinación de las dos familias de aceleradores de partículas y diferentes fuentes de iones, según su uso [5,6]. En México, los pacientes no cuentan con esta opción de tratamiento para el cáncer, siendo el principal tratamiento en radioterapia el uso de rayos X provenientes de aceleradores lineales. Mientras que, en otras naciones como Alemania y Japón existen instalaciones que proporcionan tratamiento con diferentes tipos de iones, como son iones de carbono, helio, entre otros. En particular, el objetivo del proyecto consistió en diseñar y construir una fuente de iones que pueda ser empleada para entrenar capital humano con fines educativos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales utilizados para construir la fuente de iones fueron los siguientes:

- 2.5 m de cable de cobre magneto esmaltado calibre 10 AWG
- Cámara de cristal de 15 cm de longitud, 5 cm de diámetro interior y 5.9 cm de diámetro exterior
- Helio en gas
- 2 electrodos de acero
- Fuente variable AC
- Transformador de alto voltaje
- Aluminio de 8.9 cm de diámetro y 15 cm de longitud
- 4 adaptadores de manguera de 3/8"
- 1 m de Manguera transparente de 3/8"
- 2 válvulas de bola de 1/2"

Para generar el plasma se necesita llegar a la energía de ionización de cada elemento, es decir, la energía que se debe transferir a los electrones en sus diferentes orbitas para poder superar la energía de atracciones nucleares y de Coulomb, para el helio se necesita transferir 24 eV por medio de inducción electromagnética.

A partir de la ley de inducción de Faraday se puede observar que un campo magnético de flujo variable inducirá un campo eléctrico, de acuerdo con la Ecuación 1.1:

$$\int \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (1.1)$$

La Ecuación 1.1, explica el principio de existencia de un campo eléctrico inducido. Esta dice, siempre que haya un campo magnético variante en el tiempo, se inducirá un campo eléctrico que ira en sentido opuesto al flujo del campo magnético que lo creó. El flujo del campo magnético, para una espira circular viene dado por la Ecuación 1.2:

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{a} = BA \cos\theta \quad (1.2)$$

Donde  $\vec{B}$  es el campo magnético,  $A$  es el área transversal de una espira,  $\theta$  es el ángulo donde que forma el vector normal unitario con respecto al campo, en nuestro caso el ángulo es 0 por lo tanto  $\cos\theta = 1$ , Se puede aproximar el embobinado, que se empleó para el reactor, como un solenoide, cuyo campo magnético viene dado por la Ecuación 1.3.

$$B = \mu_0 NI(t) = B = \mu_0 NI_0 \sin \omega t. \quad (1.3)$$

Donde  $N$  es el número de vueltas del embobinado del eje del solenoide, y una dependencia senoidal de la corriente AC fue asumida.

En la Ecuación 1.4 se muestra la fuerza de Lorentz que nos indica la fuerza total que siente una partícula cargada que es sometida a campos eléctricos y magnéticos.

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (1.4)$$

Sustituyendo la Ecuación 1.3 en 1.1 y 1.1, 1.3 en 1.4 tenemos la siguiente relación:

$$F = q\mu_0 NI\omega A \cos \omega t + qv \times \mu_0 NI \text{Asen} \omega t. \quad (1.5)$$

La Ecuación 1.5 proporciona la magnitud de la fuerza que sentirán las partículas al ser sometidas a campos electromagnéticos [7, 8].

El diseño realizado en Inventor Professional se muestra en la Imagen 1; se observa que el embobinado se encuentra sobre la parte exterior de la cámara de cristal y en sus extremos están las entradas de gas, con un sistema para remover de manera fácil los electrodos para cambiarlos de lugar.

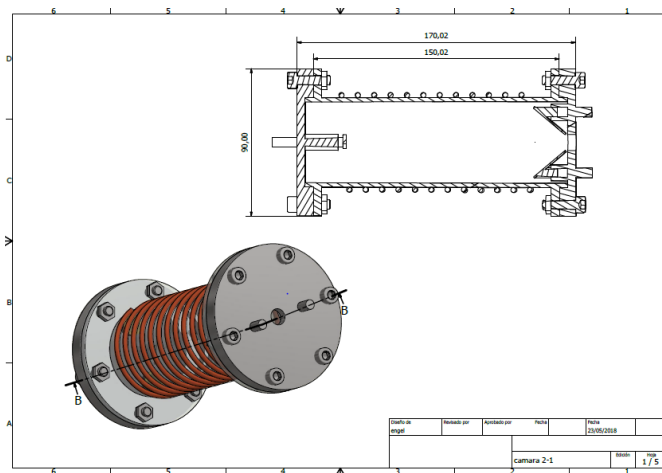


Imagen 1.- Diseño CAD 3D del reactor de plasma en Inventor Professional Autodesk.

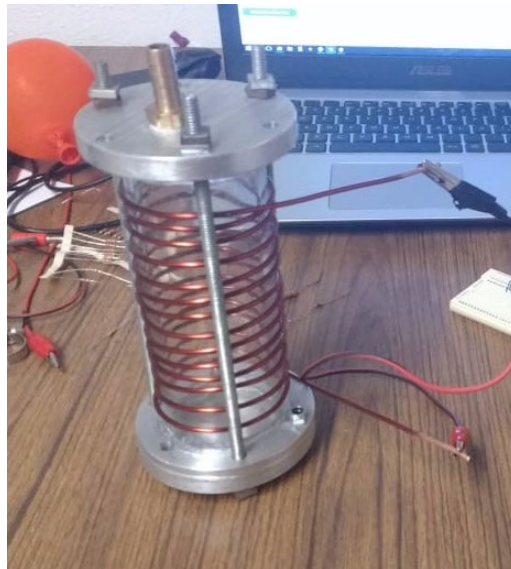
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El dispositivo final se muestra en la Imagen 2; los electrodos aún no se encuentran instalados; esto se hará como trabajo a futuro hasta lograr la generación del plasma. El embobinado (solenoides) se alimentó con una fuente variable de 0 - 120 V AC.



**Imagen 2.- el reactor obtenido después del proceso de manufactura.**

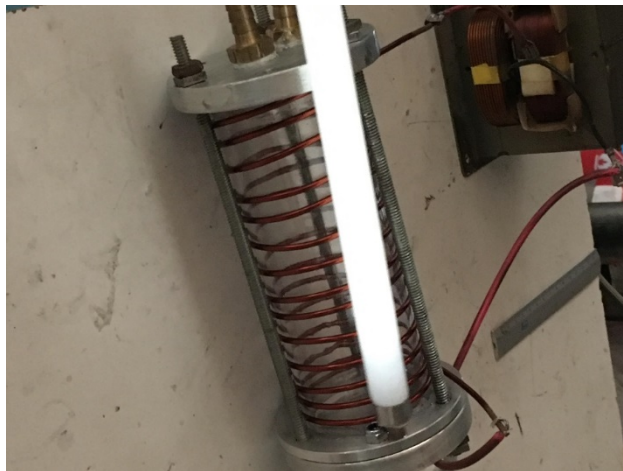
En la Imagen 3, se muestra el cambio a la estructura que se implementó para evitar fugas y pérdidas de presión ya que la fijación del vidrio con el metal fue deficiente.



**Imagen 3.-Vista del reactor con la implementación de los tornillos a lo largo del eje de la estructura para minimizar las fugas.**

En la primera prueba con una fuente variable de AC de 0 – 120 V AC, no se obtuvo la ionización en el interior del reactor ya que la potencia fue demasiado pequeña; por ejemplo, en la literatura se encontró un reactor de plasma similar donde se generaba el plasma de una mezcla de argón y helio, y se utilizó 1 kV a 300 mA a una frecuencia de 1 kHz, obteniéndose una potencia de 300 W; sin embargo, el método de generación fue por descarga de arco [9]. En una segunda prueba, se intentó generar campos a mayor potencia, para ello se utilizó un transformador de microondas con una potencia aproximada de 2400 W y 600 V de entrada. El resultado de

esta implementación no logró generar el plasma de helio, pero, al menos, se comprobó que se producía la ionización del gas en el interior de una lámpara fluorescente como se muestra en la Imagen 4, que contiene un gas de menor energía de ionización.



**Imagen 4.- Ionización del gas en el interior de una lámpara fluorescente generada por la bobina del reactor.**

Otros autores describen que para crear plasma por medio de acoplamiento inductivo o capacitivo, por descargas, según sea el caso se debe tener en cuenta lo siguiente: si se piensa inducir plasma a bajas frecuencia se debe utilizar altos voltajes en los órdenes de kV y si se quiere hacerlo por altas frecuencias se puede producir con bajos voltajes o reducida potencia [10].

Como último intento, se realizó un circuito para generar alta frecuencia con baja potencia, empleando un arreglo de amplificadores y transistores. A pesar de que se obtuvo una frecuencia en el orden de los MHz, no se logró la ionización ya que la potencia en la salida hacia la bobina era aún muy baja.

## CONCLUSIONES

Para la generación de un plasma a bajas frecuencias se debe trabajar con fuentes de alta potencia, como por ejemplo un transformador de neón, este genera voltajes del orden de KV, y puede interconectarse con una fuente variable para no suministrar toda la potencia en una sola etapa. Por otra parte, se puede hacer un circuito de alta potencia con corriente directa (DC), esta tiene una etapa de potencia final antes de ser inyectado al dispositivo lleva un inversor de corriente convirtiendo nuestra señal en AC y tiene integrado un oscilador para poder tener una frecuencia modesta en el orden de los kHz. A pesar de que no se generó plasma en el interior del reactor construido se logró identificar el problema: la baja potencia. Se encontraron formas alternas para producirlo que se implementarán en el trabajo a futuro.

## TRABAJO A FUTURO

Con base en los resultados descritos anteriormente, se pretende alimentar la fuente de iones, ya sea con una fuente de radiofrecuencia de 13.56 MHz o con una fuente de microondas; también, con altos voltajes para sostener de manera estable la generación de plasma y extracción continua de iones. En perspectiva a largo

plazo, se espera poder diseñar diferentes tipos de fuentes de iones para ser utilizadas en aceleradores de partículas, principalmente aceleradores mexicanos.

## AGRADECIMIENTOS

A mi Madre, Maria Ruth Euan Gonzalez, mis amigos Ariana Sánchez, Gonzalo Aquino y Edgar Canto por su colaboración en diferentes aspectos, así como brindarme la oportunidad y confianza de realizar esta investigación.

A mi asesor, Dr. Geoffrey Humberto Israel Maury Cuna, por la confianza, el apoyo y asesoría en todo momento durante el desarrollo de la investigación.

A la Universidad de Guanajuato, la Universidad Modelo y al Gobierno del Estado de Yucatán por su apoyo financiero gracias al cual esta oportunidad de realizar un trabajo de investigación, y disfrutar de esta grata experiencia, fue posible.

## REFERENCIAS

- [1] Garcia Tsai, M., Montero J., Calle Marlon, Q., & Sarmiento, P. (n.d.). Plasma: una tecnología de gran potencial para la industria y la ciencia. *INGENIUS*, 66-72
- [2] Rahman Abdel. (2013). Ion Sources for Use in Research and Low Energy Accelerators. *International Journal of Instrumentation Science*, 1(5), pp.63-77, DOI: 10.5923/j.instrument.20120105.02
- [3] García Tsai, M., Montero J., Calle Marlon, Q., & Sarmiento, P. (2010.). Plasma: una tecnología de gran potencial para la industria y la ciencia. *INGENIUS*, Vol. 1, No. 4, 66-72, 2010. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n4.2010.07>
- [4] Brenes, S. G. (2014). Plasma: Energía para el futuro..., recuperado el 4 de abril del 2018, desde [http://revistas.tec.ac.cr/index.php/investiga\\_tec/article/view/1709/1588](http://revistas.tec.ac.cr/index.php/investiga_tec/article/view/1709/1588).
- [5] Scrivens, R. (2006). Electron and ion sources for particle accelerators. *CERN Yellow Reports: School Proceedings*, 495-503. DOI: 10.5170/CERN-2006-002
- [6] Henning Walter y Shank Charles. (2009). Accelerators for America's Future [Brochure]. Autor. Recuperado el 4 de abril del 2018, desde <https://science.energy.gov/~media/hep/pdf/accelerator-rd-stewardship/Report.pdf>
- [7] Malamud Ernie. (2013). Accelerators and Beams, Tools of Discovery and Innovation [Brochure]. Author. Recuperado el 4 de abril del 2018, desde <https://www.aps.org/units/dpb/news/edition4th.cfm> Miranda, M.
- [8] Feynman Richard, Leigoca Robert b. & Sentis Mathew, 1998, the Feynman lectures on physics, Mainly Electromagnetic and matter, Vol. (2) pag.17.1-17.8
- [9] Weston Sears Francis, Lewis Ford A. Freedma Roger A, 2004, física universitaria, volumen 2, pag. 1151-1157.
- [10] Tepale C. Arturo, Moreno S. Hilda, Torres R. Carlos E., Hernandez T. Celso. Ideas de Ciencia. Fuente de alto voltaje para generación de plasma en un reactor cilíndrico a temperatura ambiente y a presión atmosférica. 2015;
- [11] Wildi Théodore, Salas RN, Mauro Ortega González Luis. Máquinas eléctricas y sistemas de potencia [Internet]. 6th ed. México: Pearson educación; 2007, recuperado el 21 de julio de 2018 desde: <https://books.google.com.mx/books?id=ehxKXip1j6EC&pg=PA236&lpg=PA236&dq=transformador de neon&source=bl&ots=5UfimididEo&sig=QHhfCphTd0-w78X7m5hffmoOzbc&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiasZmY1bXcAhUObawKHcfFDXU4FBD0AQhWMAg#v=onepage&q=transformador de neon&f=false>