

# Simulación de plasma y diseño de sistemas para operación y diagnóstico en el Tokamak esférico MEDUSA-CR

## Plasma Simulation and system design for operation and diagnosis in the spherical Tokamak MEDUSA-CR

Luis Alonso Araya-Solano<sup>1</sup>, Arnoldo Ramírez-Jiménez<sup>2</sup>,  
Ricardo Solano-Piedra<sup>3</sup>, José Esteban Pérez-Hidalgo<sup>4</sup>,  
Iván Vargas-Blanco<sup>5</sup>, Marvin Hernández-Cisneros<sup>6</sup>

*Fecha de recepción: 8 de marzo, 2022*

*Fecha de aprobación: 2 de junio, 2022*

Araya-Solano, L.A., Ramírez-Jiménez, A., Solano-Piedra, R.,  
Pérez-Hidalgo, J.E. Vargas-Blanco, I., Hernández-Cisneros,  
M. Simulación de plasma y diseño de sistemas para operación y diagnóstico en el Tokamak esférico MEDUSA-CR.  
*Tecnología en Marcha*. Vol. 36, N° 1. Enero-Marzo, 2023.  
Pág. 66-75.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i1.6153>

- 1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.  
Correo electrónico: [luaraya@itcr.ac.cr](mailto:luaraya@itcr.ac.cr)  
 <https://orcid.org/0000-0002-7941-821X>
- 2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.  
Correo electrónico: [aaramirez@itcr.ac.cr](mailto:aaramirez@itcr.ac.cr)  
 <https://orcid.org/0000-0002-7090-4465>
- 3 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.  
Correo electrónico: [risolano@itcr.ac.cr](mailto:risolano@itcr.ac.cr)  
 <https://orcid.org/0000-0003-3092-8654>
- 4 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.  
Correo electrónico: [jose.perez@itcr.ac.cr](mailto:jose.perez@itcr.ac.cr)  
 <https://orcid.org/0000-0001-7184-9974>
- 5 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.  
Correo electrónico: [ivargas@itcr.ac.cr](mailto:ivargas@itcr.ac.cr)  
 <https://orcid.org/0000-0001-9568-1598>
- 6 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.  
Correo electrónico: [marhernandez@itcr.ac.cr](mailto:marhernandez@itcr.ac.cr)  
 <https://orcid.org/0000-0001-6316-8204>

## Palabras clave

Tokamak esférico; plasma; fusión termonuclear controlada; equilibrio MDH; ondas de Alfvén; diagnósticos magnéticos.

## Resumen

Este proyecto simuló escenarios de confinamiento que buscan analizar diferentes formas de la sección transversal del plasma y de esta manera prever el parámetro beta óptimo en un tokamak esférico de baja razón de aspecto como lo es MEDUSA-CR. Además, se busca diseñar sistemas para operación y diagnóstico en este dispositivo. Finalmente, en este proyecto proponemos un experimento único como prueba de principio utilizando antenas RF para inducir ondas de Alfvén en un Tokamak esférico. Las simulaciones de las interacciones del plasma con las ondas electromagnéticas RF y ECRH permiten explorar en este dispositivo escenarios de calentamiento optimizado que también son del interés de la comunidad científica debido a que la alta temperatura es un requisito indispensable para procesos de fusión.

## Keywords

Spherical Tokamak; plasma; thermonuclear controlled fusion; MDH equilibrium; Alfvén waves; magnetic diagnostics.

## Abstract

This project simulated confinement scenarios that seek to analyze different shapes of the plasma cross section and thus affect the beta parameter in a low aspect ratio spherical tokamak such as MEDUSA-CR. In addition, it seeks to design systems for operation and diagnosis in this device. Finally, in this project we propose a unique proof-of-principle experiment using RF antennas to induce Alfvén waves in a spherical Tokamak. Simulations of plasma interactions with RF and ECRH electromagnetic waves allow exploring optimized heating scenarios in this device that are also of interest to the scientific community because high temperature is an essential requirement for fusion processes.

## Introducción

La comprensión generalizada de los profundos efectos del cambio climático y la creciente demanda energética del ser humano ha hecho que se preste cada vez más atención a la necesidad de generar energía con bajas emisiones de carbono y en grandes cantidades, a partir de una fuente de energía segura, limpia, respetuosa del medio ambiente y cuyo reactivo sea abundante.

Ongena and Van Oost [1] indica que, con un gramo de hidrógeno (deuterio y tritio) en estos dispositivos de fusión termonuclear controlada con las características idóneas de funcionamiento, se producirían hasta 26 000kWh. Esto convierte a estas máquinas en una de las opciones factibles para abastecer la demanda energética futura de la humanidad y una línea de investigación que se debe seguir explorando hasta alcanzar este fin. El sector privado ha mostrado un creciente interés en la investigación en fusión. En una encuesta realizada por la Fusion Industry Association y la UK Atomic Energy Authority se reportó un crecimiento acelerado en el número de empresas privadas que trabajan en pro de la fusión nuclear en los últimos 30 años. El estudio indica que 15 de las 23 empresas encuestadas (65 %) se fundaron en la última década, y 12 de ellas (52 %) solo en los últimos 5 años. En esta encuesta, las empresas de fusión declararon casi \$ 1 900 000 000 (USD) de financiamiento privado hasta la fecha, y más de

\$ 85 000 000 (USD) adicionales en subvenciones y otros fondos de los gobiernos. La mayoría de las empresas encuestadas consideró que se logrará energía de fusión en algún momento de la década de 2030 y fusión para la propulsión espacial en la década de 2030 o 2040. El parámetro beta se define como el cociente de la presión cinética y la presión magnética en el plasma, conociéndose que su incremento favorece las condiciones para que se alcancen procesos de fusión nuclear y por tanto es un área de mucho interés dentro de dispositivos de tipo Tokamak. Resolver este problema se vuelve necesario y pertinente pues como hemos mencionado la investigación en fusión nuclear tiene por objetivo una nueva fuente de energía, segura, limpia, respetuosa del medio ambiente, que utiliza el hidrógeno -el elemento más abundante del universo- en vez de materiales radiactivos como los reactores de fisión nuclear convencionales.

El problema en este proyecto se abordó mediante la simulación de equilibrio magneto-hidrodinámico del plasma con sección transversal en forma de "frijol", forma que se puede crear mediante un bobinado sobre el eje toroidal externo a la cámara de vacío en MEDUSA-CR y cuyos resultados preliminares indican una mejora en el confinamiento del plasma [2]. Complementariamente, en este proyecto se simularon nuevos escenarios de calentamiento del plasma que permitan subir la temperatura del plasma, requisito también indispensable para alcanzar condiciones de fusión. El calentamiento ECH como pre-ionización y buscar un escenario novedoso de calentamiento por ondas Alfvén también propuesto por nuestro grupo de investigación son elementos importantes para el progreso en este campo. Adicional, se diseñaron en este proyecto sistemas de operación y diagnósticos que permitan corroborar experimentalmente estos mejorados escenarios de confinamiento y calentamiento. Aunque con este equipo no se pueden alcanzar las condiciones de fusión, la investigación permitirá contribuir al conocimiento de fenómenos y al desarrollo de tecnología que puede ser escalada en dispositivos futuros para la fusión nuclear.

Aunque MEDUSA-CR se construyó inicialmente con fines educativos, es posible que se aborden algunos temas interesantes a pesar de su tamaño relativamente pequeño. Sirve principalmente para combinar conocimientos elementales entre la física y la ingeniería involucrada en descargas de plasma controladas y temas relacionados con la fusión, que a su vez podrían abordar conceptos de diseño relevantes para tokamaks esféricos y convencionales salvaguardando la relación costo-beneficio de la operación del dispositivo.

## Materiales y métodos (metodología)

### Códigos computacionales de equilibrio MHD

Las simulaciones de equilibrio MHD se realizaron a partir de los códigos desarrollados por la comunidad de plasmas y fusión alrededor del mundo. Algunos códigos son abiertos y pueden ser descargados en repositorios, otros se obtuvieron a través de contactos con las personas que integran esta comunidad. En conjunto, los códigos utilizados forman un flujo de trabajo con el que se pueden obtener diversos resultados relacionados con el equilibrio MHD. En particular, nuestro flujo de trabajo usó las rutinas VMEC, MATLAB-VMC, SIESTA, FIESTA, DESCUR y POINCARE.

Inicialmente hubo que encontrar versiones adecuadas de los códigos, por lo que primero se obtuvieron aquellos que estaban disponibles en repositorios. De esta manera se identificó el conjunto de rutinas STELLOPT. El código de STELLOPT está disponible en el siguiente repositorio: <https://github.com/PrincetonUniversity/STELLOPT> con su documentación respectiva. Las rutinas VMEC, MATLAB-VMC y DESCUR forman parte de STELLOPT y fueron estas las

versiones que se utilizaron. Seguidamente, a falta de conseguir las rutinas SIESTA y POINCARE, se hicieron solicitudes a colegas de la comunidad de fusión. La amable colaboración del Dr. Julio Martinelli de la UNAM hizo posible la adquisición de los códigos.

Una vez que se contó con los códigos se procedió a su instalación, la cual se realizó en una estación de trabajo de "plasmaubuntu" del Laboratorio de Plasmas del TEC. Para optimizar los recursos computacionales, contar con estabilidad y aprovechar una serie de ventajas del uso de software libre, se instaló en la estación de trabajo un sistema operativo GNU/LINUX, específicamente Ubuntu 18.04. Cabe destacar que la mayoría de las rutinas mencionadas de equilibrio MHD solo están disponibles para su instalación en sistemas UNIX, como es el caso de GNU/LINUX, lo que justifica la selección del sistema operativo para "plasmaubuntu".

### Código computacional para la propagación de ondas

Para la propagación de ondas de Alfvén en el plasma se escribió un código computacional abierto, en el lenguaje de programación Python en un Jupyter Notebook, que condensa la teoría y la programación relevantes. El código está disponible en el repositorio de PlasmaTECITCR de Gitlab. Este código calculó la relación de dispersión para un eslabón infinito de plasma no uniforme con los datos obtenidos del equilibrio magnetohidrodinámico calculado por VMEC, en el modo fixed boundary. Se trabajó con la magnitud del campo magnético del vacío en uno de los cortes toroidales del plasma.

Se condicionó el análisis a la propagación de ondas electromagnéticas en la coordenada  $z=0$  y con una dependencia en la coordenada  $x$  (considerada en este trabajo como la dirección radial), según lo propuesto por Vlad et al. [3]. Luego, se calculó el perfil de la magnitud de la velocidad de Alfvén en la coordenada  $x$ . Por último, se construyeron las soluciones de la relación de dispersión para el espectro continuo de las ondas de Alfvén en el plasma, denominados shear alfvén y magneto-acústicos. La resonancia de los modos de propagación de ondas de Alfvén se analiza a partir de la frecuencia ciclotrónica iónica en el modelo Hall-MHD bajo ciertas consideraciones de velocidad de fase, número de onda y campo magnético. En el caso del modo de propagación magnetoacústico, la razón de frecuencias no llegó a ser uno, por tanto, no se identificaron resonancias, por lo que se consideró como un modo de propagación intermedio. Esto implicó un modo de propagación con una velocidad de fase intermedia entre los modos magnetoacústico rápido y magnetoacústico lento. En el modo de propagación shear alfvén, al estar desacoplado de los modos de propagación magnetoacústica por el estado intermedio, se presentaron resonancias en los puntos donde la frecuencia de las ondas sea igual a la frecuencia iónica ciclotrónica en cinco posiciones radiales. En estos puntos fue donde la energía de la radiación electromagnética se acumuló y el campo magnético de las ondas incidentes aumentó de forma estocástica, por lo que prohibió a la radiación viajar por el plasma [4]. Este modo de propagación se catalogó como Slow Alfvén wave a raíz de que su velocidad de fase es menor a la velocidad de Alfvén [5].

### Sistema de calentamiento ECRH para MEDUSA-CR

Tomando en cuenta la frecuencia de resonancia ciclotrónica electrónica del campo magnético en MEDUSA-CR, se seleccionó la fuente de microondas más adecuada para la aplicación y así como la potencia máxima que puede manejar el sistema. A esto se le sumó todo el sistema de componentes necesarios para entregar esa potencia en la cámara de vacío y sus respectivos sistemas de protección. Para todo esto se utilizó la experiencia ya adquirida en el Stellarator SCR-1. Tomando como referencia los componentes necesarios identificados; se ubicaron proveedores con la experiencia y capacidad para la venta de estos.

## Potencia y Sistema de control para la operación Tokamak MEDUSA-CR

Se definen tres entradas del sistema de alimentación: la fuente de energía, las señales de control y las corrientes parásitas que se pueden generar en circuitos de alta potencia como el que se está trabajando. Iniciando desde la fuente de energía, se estableció como suministro un banco de capacitores que almacena la potencia necesaria para poder accionar las bobinas. Como se tienen 3 bobinas, la energía se distribuye en 3 bancos de capacitores especializados para cada una, esto se debe a que un solo banco no es capaz de distribuir la potencia necesaria y propagarla a través del sistema sin producir demasiadas pérdidas, además se tendría un exceso de energía para varias de las bobinas. Se observa que cada banco dará lo necesario para generar las corrientes y voltajes deseados en la salida. Seguidamente, para las bobinas OH y TF, se debe realizar un proceso de conversión para alcanzar el requerimiento de una señal pulsante en cada una, por lo que se define un convertidor específico para cada una que provee los pulsos que necesitan para generar los campos magnéticos que confinan el plasma. Para la bobina VF, como solo se requiere corriente continua, se establece un único convertidor DC-DC que requiere menos potencia que los otros convertidores. La tercera entrada consiste en las diferentes señales de control que van a manejar los drivers de los componentes semiconductores. Estas señales van a ser manipuladas en un sistema integrado que realiza todos los cálculos que se necesitan para lograr los pulsos o la señal DC respectivamente para cada bobina. Para establecer el control será necesario conocer la topología que se va a usar y los valores de transmutación de los semiconductores, además de una técnica de control. El plasma generado dentro de la cámara de vacío, producto del confinamiento magnético exitoso, no se considera una salida del sistema de alimentación contemplado en este proyecto, pues es el resultado de varios sistemas trabajando en conjunto y sus propiedades no pueden ser simuladas.

## Diagnósticos magnéticos para MEDUSA-CR

Para el lazo diamagnético las corrientes fueron consideradas como flujos poloidales. Para un lazo diamagnético de N vueltas con un radio menor de  $a_v$ , la corriente diamagnética se calculó

$I_s = \frac{p \perp >}{B_\phi}$  considerando la geometría de la cámara de vacío, según Wootton [6] la corriente diamagnética se calculará de la siguiente forma:

$$I_s = \frac{1}{NM} \left[ \int_0^t \varepsilon dt + \frac{L}{\Omega} \varepsilon \right] \quad (1)$$

Donde M y L son áreas de la cámara de vacío y  $\Omega$  una razón de perímetros

El arreglo de las bobinas de Mirnov, que en total serán 6 bobinas equidistantes con una sección transversal poloidal de bajo beta poloidal serán instaladas dentro de la cámara de MEDUSA-CR. El beta poloidal caracteriza la razón entre la presión de plasma y la presión del campo magnético en una sección transversal y se describe en la siguiente ecuación.

$$\beta_p = \frac{8\pi}{\mu_0 I_p^2} \int_{S_\phi} p S_\phi \quad (2)$$

La bobina de Rogowski es toroidal y mide corriente eléctrica. La diferencia de potencial en la bobina es proporcional al número de vueltas N en la bobina y a la derivada del tiempo del flujo magnético, y la corriente se obtuvo de la Ley de Ampere, utilizando las siguientes ecuaciones:

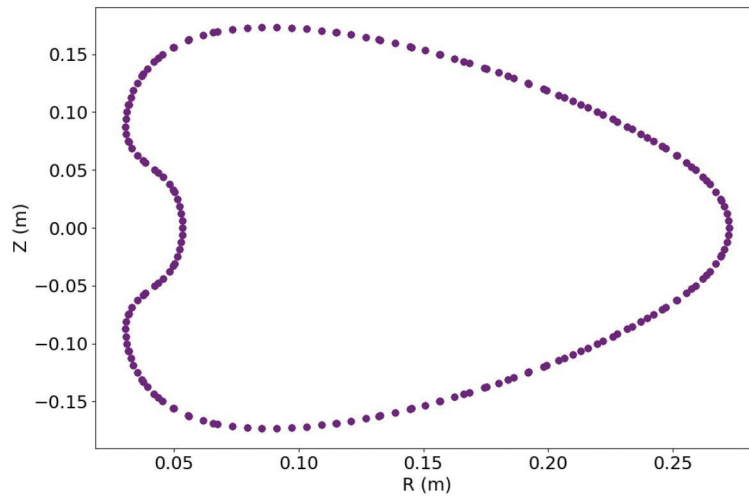
$$V_{Rgw} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (3)$$

$$I = -\frac{2\pi R_{Rgw}}{\mu_0 N a_{Rgw} b R_{gw}} \left( \int V_{Rgw} , dt \right) \quad (4)$$

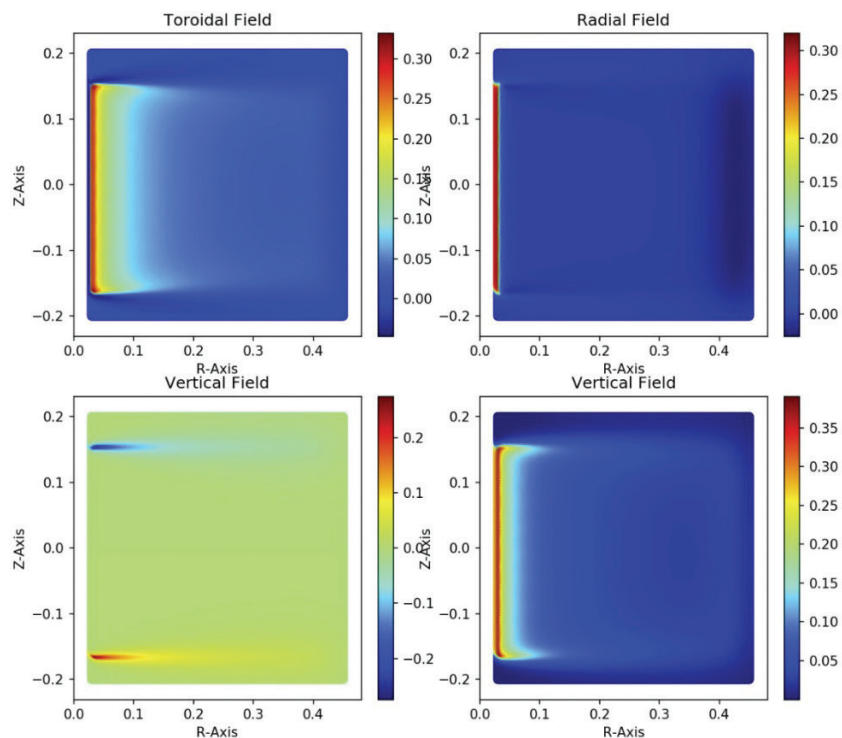
## Resultados

El código DESCUR se utilizó para calcular los coeficientes de una serie de armónicos de Fourier, obtenidos a partir de las coordenadas de la última superficie de flujo magnético de MEDUSA-CR. La figura 1 presenta las coordenadas radial y vertical obtenidas de esta última superficie.

La magnitud del campo magnético obtenida a partir de MAKEGRID utilizando solo el campo de las bobinas toroidales se presenta en la figura 2.

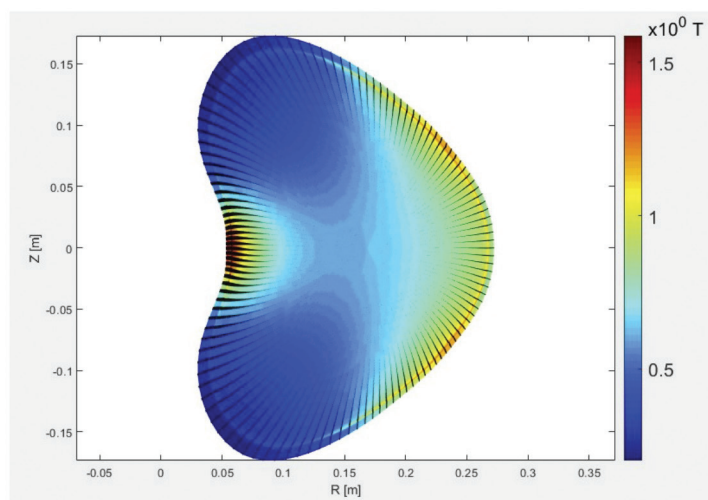


**Figura 1.** Superficie de flujo magnético calculada a partir de los coeficientes de la serie armónica de Fourier para MEDUSA-CR.



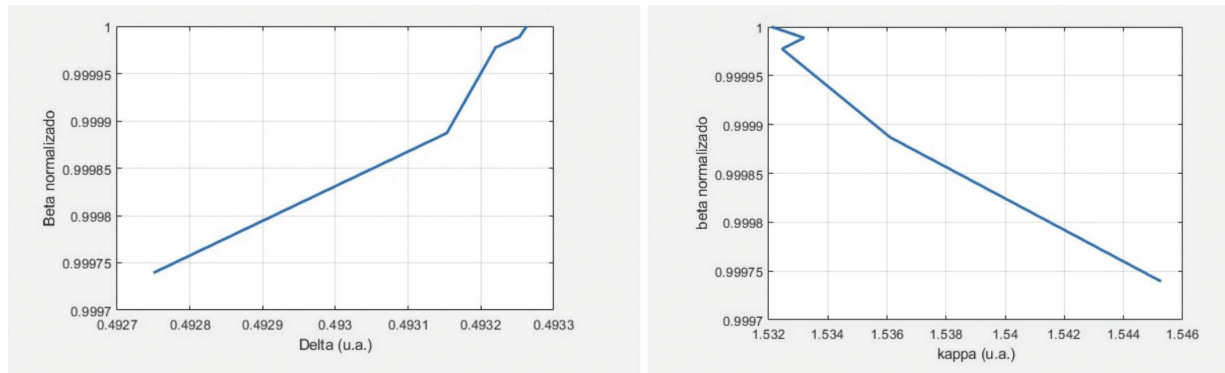
**Figura 2.** Campo magnético de MEDUSA-CR producido únicamente por las bobinas toroidales. La barra muestra el valor de campo magnético en unidades de Tesla.

Con los archivos modificados utilizando los códigos anteriormente vistos, se precede a ejecutar las rutinas VMEC-MATLAB. Estas rutinas son las que nos permiten visualizar los resultados de VMEC. Para hacer usos de los archivos se debe de agregar la librería para la lectura de archivos netCDF, además de ejecutar ciertos comandos según el script que se esté utilizando y especificar en algunos casos el parámetro del arreglo “extcur” de la corriente en las bobinas de MEDUSA-CR. El resultado en el modo de simulación de “frontera fija” se muestra en la figura 3.



**Figura 3.** Distribución del campo magnético para MEDUSACR según VMEC en su modo fixed.

Los parámetros de elongación y triangularidad se obtienen de la última superficie magnética cerrada LCFS (Last Closed Flux Surface) ó “separatrix”. El cambio del parámetro beta según la variación de la triangularidad y elongación se muestra en la figura 4.



**Figura 4.** Beta de MEDUSACR en función de la triangularidad (izquierda) y elongación (derecha).

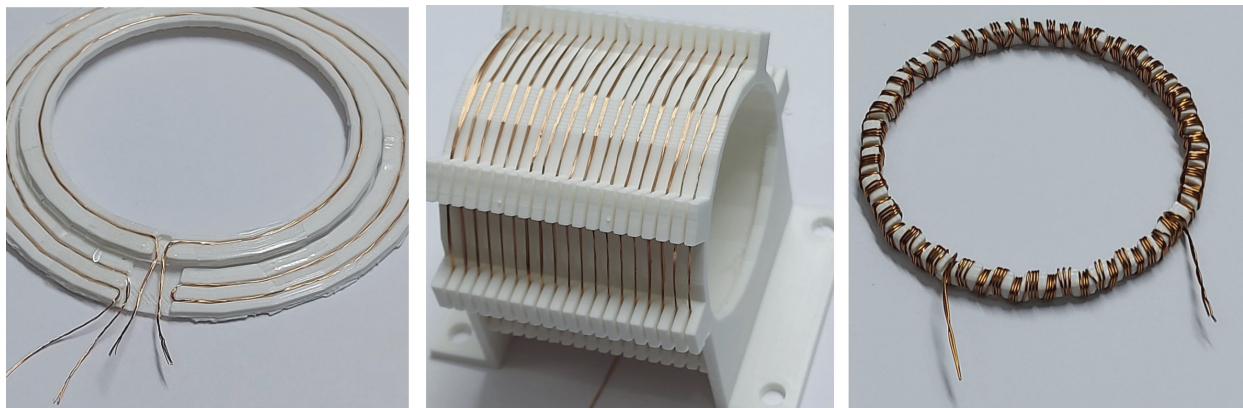
El Tokamak esférico MEDUSA-CR permite calentamiento ECR lazando las microondas desde el lado de alto campo, en inglés High Field Side (HFS) y desde el lado de bajo campo, en inglés Low Field Side (LFS). Por lo anterior se seleccionó un girotrón de rango medio, a una frecuencia de 30 GHz y una potencia entre 50 kW y 100 kW, similar al empleado en ETE [7]. La idea es solicitar ayuda técnica y precios especiales para el Laboratorio de Plasmas del TEC, dado que un girotrón, con las especificaciones apuntadas, de 30 GHz y 100 kW, tiene un costo de más de \$20 000 (USD).

El lazo diamagnético se construye con un alambre de sección transversal de 1,2 mm de diámetro, con un diámetro interno de 50 mm y uno externo de 54 mm, el material para implementar el soporte mecánico de este diagnóstico es resina fenólica con un grosor de 0,85 mm. El cable utilizado para construir el lazo es 28 AWG. Se tienen dos lazos de flujos, interno y externo, con diámetros de 50,15 mm y 55,85 mm respectivamente y áreas de encierro de aproximadamente 1975 cm<sup>2</sup> y 2450 cm<sup>2</sup> respectivamente.

Las bobinas de Mirnov se acomodaron en el eje poloidal de manera equidistante con un total de 6 bobinas, este grupo de bobinas se repite en 6 diferentes posiciones en el eje toroidal, con un ángulo de 60° para ambos ejes y fuera de la cámara de MEDUSA-CR. Las mediciones que se obtengan de las bobinas proporcionan información tanto de las oscilaciones de Mirnov como de turbulencia.

Las bobinas de Rogowski se fabricaron con un alambre de cobre con diámetro de 1,2 mm 26 AWG, y se colocan externas al plasma generado dentro de la cámara, con la finalidad de medir la integral de contorno del campo magnético que atraviesa la superficie encerrada. La señal de corriente incluye las contribuciones del flujo de corriente en las paredes de la cámara. Las bobinas fabricadas tienen una respuesta lineal en frecuencia de 985 kHz. El plasma se monitorea en el eje poloidal dentro de la cámara de vacío, que es paralelo al plasma con la finalidad de caracterizar la descarga y estimar la resistividad del plasma. En la figura 5 se observa la implementación de los diagnósticos magnéticos.





**Figura 5.** Prototipo de lazo diamagnético, bobina de Mirnow y bobina de Rogowski.

### Conclusiones y/o recomendaciones (discusión)

Los resultados de la aplicación de DESCUR muestran una superficie cerrada de equilibrio muy similar a la que se obtuvo previamente con la utilización del código FIESTA. Se puede corroborar que se hizo una correcta configuración magnética de MEDUSA-CR con la *figura 2*, se ve claramente la delimitación dada por las bobinas de campo toroidal, este resultado se puede equiparar a los que se obtendría mapeando el campo dado por el bobinado, aunado al movimiento de las partículas sujeto a dicho campo, i.e. con DESCUR se logra una suerte de seguimiento de las líneas de campo. Los valores más altos de los límites beta pueden mejorar el factor de seguridad; y esto, a su vez, puede permitir que MEDUSA-CR trabaje con corrientes de plasma más altas utilizando la configuración en forma de frijol. Una posición variable en esta bobina de campo vertical es factible, aunque no se considera en la configuración original de nuestro Tokamak. Vale la pena analizar el caso, ya que sirve para optimizar la forma del plasma. Los esfuerzos que se realizaron para conseguir los códigos, instalarlos, compilarlos y ejecutarlos generaron experiencia y aprendizajes que requieren ser aplicados para realizar más estudios. Como se ha mencionado anteriormente, el próximo paso a seguir para continuar con el desarrollo de la plataforma computacional es comenzar a utilizar infraestructura computacional de alto rendimiento. Una plataforma de este tipo brindaría ventajas en cuanto a alto rendimiento, escalabilidad, estabilidad, alta disponibilidad y seguridad. Tanto el girotrón de 30 GHz como el magnetrón de 5,8 GHz que se utilizarán en MEDUSA-CR deben de ser de onda continua (CW) y no surgirán problemas de calentamiento debido a la corta duración de los disparos o descargas de plasma (1,0 ms a 3,0 ms).

De este proyecto se obtienen las siguientes conclusiones:

- Existen puntos espaciales donde el modo de propagación shear Alfvén entra en resonancia con el plasma del dispositivo MEDUSA-CR, a parte fue catalogada en general como slow Alfvén waves.
- No existen resonancias en el modo magneto-acústico del plasma de MEDUSA-CR, por lo que es posible afirmar la existencia de un modo de propagación denominado intermedio de las ondas electromagnéticas entre el modo fast magnetoacoustic y el modo slow magnetoacoustic.

- Es posible calentar al plasma mediante el modo ordinario de propagación de ondas electromagnéticas para el método ECRH en regiones cercanas al núcleo del plasma de MEDUSA-CR debido que no se identificó puntos radiales donde las ondas electromagnéticas se reflejen.
- El mejor desempeño de respuesta en frecuencia para lazo diamagnético se obtuvo utilizando cable de cobre con un diámetro de 1,2 mm en sección transversal con inductancia de hasta 24  $\mu\text{H}$  y frecuencia de 10 kHz.

A continuación, se indican las sugerencias sobre aspectos del problema no tratado en el trabajo y sobre proyectos futuros que podrían desprenderse del mismo.

- Desarrollar el cálculo de la propagación de ondas electromagnéticas en el plasma para establecer ondas de Alfvén a partir de una geometría toroidal simétrica donde es posible obtener varios espectros, tanto continuos como discretos.
- Analizar las especificaciones, así como los detalles de posicionamiento del girotrón y simulaciones de radiación de potencia, frecuencia base, así como armónicos para el calentamiento del plasma de MEDUSA-CR a partir del ECRH.
- Es necesaria la implementación de bobinas de Mirnov a lo interno de la cámara de vacío con la finalidad de estudiar directamente el plasma sin las contribuciones de corrientes en las paredes de la cámara de vacío.

## Agradecimientos

Se agradece a la VIE por la oportunidad y facilidades brindadas para promover la investigación en el campo de la fusión nuclear en el ámbito académico a nivel internacional.

## Referencias

- [1] J. Ongena and G. Van Oost, "Energy for future centuries: Prospects for fusion power as a future energy source," *Fusion Sci. Technol.*, vol. 61, no. 2T, pp. 3–16, 2012.
- [2] C. Ribeiro, J. J. E. Herrera, and E. Chavez, "Bean-shaped spherical tokamak equilibrium with ergodic limiter," *IEEE Trans. Plasma Sci. IEEE Nucl. Plasma Sci. Soc.*, vol. 42, no. 3, pp. 585–589, 2014.
- [3] G. Vlad, F. Zonca, and S. Briguglio, "Dynamics of Alfvén waves in tokamaks," *Riv. Nuovo Cimento*, vol. 22, no. 7, pp. 1–97, 1999.
- [4] D. G. Swanson. Plasma waves. Institute of Physics Pub., 2003.
- [5] N. F. Cramer. The physics of Alfvén waves. Wiley-VCH, 1st ed edition, 2001. ISBN 3527402934;9783527402939.
- [6] A. Wootton. *Utxas.edu*. [Online]. Available: <https://web2.ph.utexas.edu/~iheds/magneticfieldsinatokamak.pdf>. [Accessed: 07-Mar-2022].
- [7] G.O. Ludwig, E. Del Bosco, J.G. Ferreira, L.A. Berni, R.M. Oliveira, M.C.R. Andrade, C.S. Shibata, M. Ueda, L.F.W. Barbosa *Scielo.br*. [Online]. Available: <https://www.scielo.br/j/bjp/a/zrybR7hsvPf7SXXyx8Y7N6j/?format=pdf&lang=en>. [Accessed: 07-Mar-2022].