

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN
ESCUELA DE FÍSICA



Diagnóstico del Tokamak Esférico MEDUSA-CR

Informe final

Investigador coordinador:
Dr. Iván Vargas Blanco

2017

Tabla de Contenido

Código y Título del Proyecto	3
Autores y Direcciones	3
Resumen	5
Palabras Clave	5
Introducción	6
Marco Teórico	9
Metodología	12
Objetivo Específico #1.	12
Objetivo Específico #2.	14
Resultados	16
Sistema de alimentación de las bobinas	16
Estado actual	16
Necesidades	21
Sistema de condiciones de vacío	21
Estado actual	22
Necesidades	22
Procedimiento de Desarme:	24
Necesidades	31
Sistema de inyección de gas	34
Estado actual	34
Necesidades	36
Sistema de control	40
Estado actual	40
Necesidades	40
Sistema de calentamiento de plasma	42

Estado actual	42
Necesidades	42
Espacio físico.	43
Conclusiones	44
Recomendaciones	45
Referencias	46

VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN
ESCUELA DE FÍSICA

Título del Proyecto

Diagnóstico del Tokamak Esférico MEDUSA-CR

Código del Proyecto: 5402-1801-0504

Investigador coordinador:

Dr. Iván Vargas Blanco
Instituto Tecnológico de Costa Rica
e-mail: ivargas@itcr.ac.cr

Investigador colaborador:

Ing. Jaime Mora Meléndez (Licenciado)
Instituto Tecnológico de Costa Rica
e-mail: jamora@itcr.ac.cr

Resumen

El 20 de febrero de 2013 el Instituto Tecnológico de Costa Rica firmó el “*Used Equipment Sales Agreement*” con la “*University of Wisconsin-Madison*” de EE.UU donde se formaliza la compra por \$ 1 (un dólar) de las partes industriales del Tokamak Esférico llamado MEDUSA (*Madison EDUcation Small Aspect ratio tokamak*) y un banco de 3000 capacitores (1500 μ F, 450 VDC). Esta actividad de fortalecimiento tuvo por objetivo general el diagnosticar el estado en el que se encuentra el equipo llamado MEDUSA-CR ubicado en la actualidad en el Laboratorio de Plasmas para Energía de Fusión y Aplicaciones.

Se realizaron dos objetivos específicos que buscaban: (1) Examinar el estado de los diferentes sistemas del Tokamak Esférico MEDUSA-CR y (2) Determinar las necesidades para implementarlo. La metodología utilizada fue inspección visual de los sistemas utilizando el criterio de experto para determinar su estado, así como el uso de equipo especializado y una guía técnica para el dispositivo [1]. Se elaboraron listados de componentes a reemplazar y necesarios para su construcción identificando al menos un proveedor, así mismo se indicaron las recomendaciones necesarias para la puesta a punto de forma segura.

Como conclusión esta actividad logró identificar el estado actual de los diferentes sistemas en el Tokamak Esférico MEDUSA-CR desde el punto de vista de ingeniería. Así mismo se determinaron las necesidades para implementarlo al plantear mejoras para el funcionamiento del dispositivo y obteniendo listados de componentes por comprar. Como principal resultado se demuestra la viabilidad de poner en funcionamiento este Tokamak abriendo el camino para futuros proyectos de investigación.

Palabras Clave

Tokamak Esférico, confinamiento magnético, fusión nuclear, fuente de energía.

Introducción

El 20 de febrero de 2013 el Instituto Tecnológico de Costa Rica firmó el “*Used Equipment Sales Agreement*” con la “*University of Wisconsin-Madison*” donde se formaliza la compra por \$ 1 (un dólar) de las partes industriales del Tokamak Esférico llamado MEDUSA (*Madison **EDU**cation **S**mall **A**spect ratio tokamak*) y un banco de 3000 capacitores (1500 μ F, 450 VDC). Con la firma de este documento se procedió a pagar a la empresa *Reynolds Transfer and Storage, Inc* el transporte del equipo al ITCR y se atendió los trámites para que el equipo fuera enviado, entrara al país y fuera entregado en el ITCR finalmente el 12 de diciembre de 2014.

Un Tokamak Esférico es un tipo de dispositivo de confinamiento magnético de plasmas de alta temperatura para investigación en energía de fusión basado en el principio tokamak (acrónimo de palabras rusas que en español significan cámara toroidal con bobinas magnéticas). Un tokamak tradicional cuenta con un área de confinamiento magnético toroidal que le da una forma general similar a una rosquilla, con un gran agujero en el centro [1]. El tokamak esférico reduce el tamaño del agujero en el centro casi a cero, resultando en una forma de plasma casi esférico, a menudo comparado con una manzana con núcleo. Tiene una serie de ventajas prácticas sustanciales sobre los tradicionales tokamaks entre las cuales se puede mencionar la reducción de inestabilidades en el plasma, convirtiéndolo en la actualidad en un dispositivo de mayor interés científico que el tokamak tradicional.

Durante los años 2013 y 2014 se ejecutó en el ITCR el proyecto de investigación titulado “Implementación para investigación en plasmas como futura fuente de energía del dispositivo de confinamiento magnético de tipo Tokamak Esférico llamado MEDUSA en Costa Rica” cuyo investigador responsable ante la institución fue el Dr.-Ing. Saúl Guadamuz Brenes de la Escuela de Ingeniería en Electrónica.

Este proyecto contó con la participación del Dr. Celso Ribeiro, de nacionalidad brasileña, quien fue contratado como profesor visitante para el periodo del 01 de agosto de 2012 al 23 de julio de 2013 [según Resolución de Rectoría R-742-2012] y como profesor invitado del 01 de agosto de 2013 al 23 de julio de 2014 [según oficio SCI-710-2013]. Para el término del proyecto se abrió el Concurso de Antecedentes Externo RH-111-2014 para el puesto de Profesor (a) Investigador a tiempo completo en el proyecto anteriormente mencionado, en el cual fue contratada la Ing. Laura Barillas en sustitución del señor Celso Ribeiro quien decidió no continuar en el proyecto. Este proyecto como indica su título

buscó ser una primera etapa para la instalación de este equipo en el ITCR, sin embargo, los contratiempos y retrasos que se dieron en la traída al país del equipo MEDUSA llevaron a que no se realizara ninguna fase de diagnóstico e implementación.

Consecuencia de lo anterior, existía la necesidad de realizar un estudio del estado actual del equipo MEDUSA-CR y su banco de 3000 capacitores (1500 μ F, 450 VDC) que permitiera examinar todos sus sistemas y determinar las necesidades para una futura implementación a través de un nuevo proyecto de investigación. Fue así como al término del anterior proyecto se sometió y dictamina ante las instancias respectivas la Actividad de Fortalecimiento titulada “Diagnóstico del Tokamak Esférico MEDUSA-CR” siendo aprobada por el Consejo de Escuela de Física y el Consejo de Investigación y Extensión para ser ejecutada del 01 de abril de 2015 al 31 de diciembre de 2015 por un periodo de 9 meses.

En esta actividad figuró como investigador responsable el Dr. Iván Vargas Blanco con 2 horas de reconocimiento y un investigador a contratar por concurso externo utilizando las 10 horas en plaza VIE ya aprobadas por paso de categoría de Investigador Consolidado 1 (según oficio VIE-017-15). Posteriormente y ante los retrasos en el proceso de contratación del investigador el Consejo de Investigación y Extensión en su acuerdo No.15-2015, Artículo 12, del 17 de agosto del 2015 modifica el periodo de ejecución de la actividad del 01 de julio de 2015 al 20 de abril de 2016 y se finaliza el proceso del Concurso Externo RH-142-2015 contratando al Ing. Jaime Mora Meléndez quien inició labores el 20 de julio de 2015 después del periodo de vacaciones institucional.

Como se mencionó anteriormente esta actividad de fortalecimiento tuvo por objetivo general el diagnosticar el estado en que se encuentra MEDUSA-CR ubicado en la actualidad en el Laboratorio de Plasmas para Energía de Fusión y Aplicaciones. Para esto se realizaron dos objetivos específicos que buscaban: (1) Examinar el estado de los diferentes sistemas del Tokamak Esférico MEDUSA-CR y (2) Determinar las necesidades para implementarlo.

La metodología utilizada fue inspección visual de los sistemas utilizando el criterio de experto para determinar su estado, así como el uso de equipo especializado y una guía técnica para el dispositivo [1]. Se elaboraron listados de componentes a reemplazar y necesarios para su construcción identificando al menos un proveedor, así mismo se indicaron las recomendaciones necesarias para la puesta a punto de forma segura. Se seleccionó esta metodología con el fin de poder evaluar el estado y las necesidades de los diferentes sistemas, tales como la fuente de alimentación de las bobinas (banco de 3000 capacitores), el sistema para condiciones de vacío, el sistema de inyección de gas a la cámara de

vacío, el sistema de control, el sistema de calentamiento de plasmas y finalmente se realizará una valoración de la necesidad de espacio físico para la puesta en funcionamiento del equipo MEDUSA-CR.

La importancia de atender el problema planteado en esta actividad de fortalecimiento es clara, ante la necesidad de saber si es viable la implementación futura del Tokamak Esférico MEDUSA-CR diagnosticando los sistemas que permitirán su funcionamiento y haciendo una valoración de necesidades, así como identificar desde ya mejoras al equipo como un todo. Los resultados de este estudio permiten definir un camino para continuar la puesta en marcha de este equipo y la futura explotación científica.

Marco Teórico

La investigación en fusión nuclear tiene por objetivo la búsqueda de una nueva fuente de energía renovable que utiliza por combustible el hidrógeno, el elemento más abundante del universo y que no utiliza materiales radiactivos como los reactores de fisión nuclear convencionales. Mediante el uso de dispositivos de confinamiento magnético se pretende confinar un plasma a más 100 millones de Celsius (aproximadamente 10 veces la temperatura del centro del Sol) permitiendo con ello el inicio de procesos nucleares entre los isótopos del hidrógeno llamados Deuterio y Tritio.

A estas temperaturas la fuerza que domina las colisiones entre las especies presentes no es la fuerza de coulomb, son fuerzas nucleares [2]. En el proceso se produce un núcleo de Helio, es decir dos protones - dos neutrones y se libera un neutrón además de la diferencia de energía según la relación de Albert Einstein, $\Delta E = \Delta mc^2$. Es justamente esta gran cantidad de energía liberada la que se pretende utilizar para producir electricidad. Se dice que con un solo gramo de combustible en los dispositivos que generan estos procesos nucleares se podría producir 26 000 kWh. Es claro que en la actualidad no existe ninguna fuente de energía con capacidad de igualar a la energía de fusión de allí que se diga que representa la solución al problema energético de la humanidad.

A lo largo de la historia se han investigado distintos métodos y dispositivos para generar la fusión nuclear controlada dentro de los cuales se puede mencionar; confinamiento magnético, confinamiento inercial, confinamiento por pinzamiento, confinamiento electrostático magnético y otros como fusión por blancos magnetizados. A la fecha se ha obtenido mayores progresos en el método por confinamiento magnético. Existen diferentes dispositivos que utilizan este método pero los más estudiados en la actualidad son los llamados Tokamak y Stellarator [3].

Tokamak es el acrónimo de palabras rusas que en español significan cámara toroidal con bobinas magnéticas, el concepto se debe a los físicos rusos Igor Tamm y Andréi Sajarov quienes lo inventaron en el año 1952. El Tokamak consta de una cámara de vacío en forma toroidal, rodeada de bobinas por las que se hace circular una corriente eléctrica que crea un campo magnético en la dirección toroidal. Mediante un efecto transformador, el plasma actúa como secundario del transformador, en el que se induce una corriente eléctrica toroidal que a su vez genera un campo magnético en la dirección poloidal. La combinación de las componentes del campo magnético toroidal y poloidal dan lugar a un campo magnético helicoidal que confina el plasma. El tokamak ha resultado ser muy

exitoso en la mejora de las condiciones para plasmas de fusión y hoy el mayor experimento en fusión por confinamiento magnético en construcción está basado en este principio, y es llamado ITER (acrónimo de International Thermonuclear Experimental Reactor y en latín significa "el camino") [4].

Los dispositivos de confinamiento magnético como los tokamaks y los stellaratos se suelen caracterizar por su razón de aspecto, esto es el cociente del radio de máquina o radio de curvatura de la forma toroidal y el radio medio del plasma. Particularmente se ha despertado el interés por los tokamaks de razón de aspecto pequeña debido a que se ha demostrado que generan menos inestabilidades en el plasma [5]. Una forma de disminuir la razón de aspecto es reduciendo el círculo central de la forma toroidal de la cámara de vacío que confina el plasma. Un tokamak con razón de aspecto baja y por tanto más compacto es llamado hoy en día tokamak esférico. En el mundo existen en operación 8 tokamaks esféricos que se listan a continuación:

1. MAST, Culham Science Center, United Kingdom
2. Globus-M, Ioffe Institute, Russia
3. NSTX, Princeton Plasma Physics Laboratory, United States
4. Proto-Sphera (formerly START), ENEA, Italy
5. TST-2, University of Tokyo, Japan
6. SUNIST, Tsinghua University, China
7. PEGASUS, University of Wisconsin-Madison, United States
8. ETE, National Space Research Institute, Brazil

La invención de los tokamaks esféricos ha despertado el interés en estos dispositivos al constituir un reactor de fusión más compacto y con un menor costo. El Tokamak Esférico MEDUSA (Madison EDUcation Small Aspect ratio spherical tokamak), tiene un radio mayor de $R < 0.14$ m, radio menor de $a < 0.10$ m, campo toroidal $B_T < 0.5$ T, corriente del plasma $I_p < 40$ kA, y 3 ms de pulso; fue construido y operado en la Universidad de Wisconsin en Madison [6]. Su objetivo fue formar a los estudiantes y allanar el camino para el diseño del tokamak esférico mediano PEGASUS, ya en operación en esta institución.

Este dispositivo ha sido donado para investigación al Instituto Tecnológico de Costa Rica y junto al Stellarator de Costa Rica 1 (SCR-1), actualmente en funcionamiento en esta institución, constituyen dos dispositivos muy relevantes para contribuir a la ingeniería y física para fusión nuclear. Tanto MEDUSA-CR (renombrado así) como el SCR-1 son dispositivos pequeños, que permiten a bajo costo realizar investigación en fusión. Debido a los altos costos en los que se debe incurrir para construir dispositivos grandes resulta una opción de menor costo y permiten guiar máquinas de gran tamaño en varias tareas que son relevantes para

la fusión [5].

Además de la dirección en física e ingeniería (y algunos en una base total de prueba de principio), los dispositivos de confinamiento magnéticos pequeños para plasmas también pueden actuar como un banco de pruebas de dispositivos para reducir la proporción de costo-riesgo/beneficio en dispositivos de gran tamaño. Lo anterior hace inviable la evolución de lo contrario debido al aumento del presupuesto experimentado por muchas instituciones en todo el mundo, causadas por los recortes presupuestarios y los compromisos cada vez mayores con los proyectos conjuntos internacionales como el ITER. Por lo tanto, los dispositivos pequeños son ahora más importantes que nunca y pueden servir de guía tanto a los Tokamaks grandes convencionales, como a los esféricos.

Realizar el diagnóstico de todos los sistemas e identificar las necesidades de componentes y equipos resulta fundamental para la futura implementación del Tokamak esférico MEDUSA-CR en Costa Rica. Es destacable señalar que los dispositivos MEDUSA-CR y SCR-1 serán los primeros nuevos experimentos en investigación en fusión operativos en toda América Latina durante más de una década, lo que convierte a Costa Rica en uno de los países de la región líderes en el campo, ayudando de esta manera a nuestro país a mantener y contribuir eficazmente al esfuerzo mundial en la investigación de la energía de fusión.

MEDUSA-CR, como se llamará el Tokamak Esférico en Costa Rica, desempeñará un papel vital para la formación de una nueva generación de científicos y tecnólogos necesarios a nivel local e internacional debido a los proyectos internacionales como el ITER. Además de que permitirá abordar cuestiones importantes de la física pertinentes para Tokamaks convencionales y esféricos, como el transporte anómalo, la carga térmica del plasma mediante el escalado de los datos de un tokamak esférico en operación con una configuración de divertor natural bajo un limitador magnético ergódico, explorando también las posibilidades de calentamiento y transmisión de corrientes a través de un sistema de ondas de Alfvén, además del desarrollo de diagnósticos para el dispositivo [7].

Metodología

Objetivo Específico #1.

Examinar el estado de los diferentes sistemas del Tokamak Esférico MEDUSA-CR.

El dispositivo experimental MEDUSA-CR se encuentra actualmente en el Laboratorio de Plasmas para Energía de Fusión y Aplicaciones por lo que se analizó el estado de los sistemas en este lugar. Por otro lado el banco de 3000 capacitores (1500 μF , 450 VDC) se examinó en la nave del Centro de Investigación en Vivienda y Construcción (CIVCO) donde se encontraba durante el desarrollo de esta actividad.

1.1 Examinar el estado actual de la fuente de alimentación de las bobinas.

Se realizaron visitas periódicas al Centro de Investigación en Vivienda y Construcción (CIVCO) donde se encontraba el banco de 3000 capacitores (1500 μF , 450 VDC). Esto permitió realizar una inspección visual para revisar el estado físico de los soportes y los PCB (Placas de montaje) de los capacitores. Puesto que no se logró encontrar en el TEC una fuente que permitiría energizar los capacitores para realizar las pruebas; se solicitó este equipo al ICE en sus instalaciones en Paraíso de Cartago.

De esta manera se utilizó instrumentación adecuada se realizaron pruebas para demostrar que los capacitores pueden cargarse y entrar en operación, para ello se tomaron 10 capacitores al azar y se cargaron utilizando la fuente que se muestra en la Figura 1 por el periodo de tiempo requerido y midiendo posteriormente la carga acumulada. Las necesidades para el uso de banco de capacitores se identificaron según el criterio de experto y los resultados obtenidos en las pruebas.



Figura 1. Pruebas a los capacitores.

1.2 Examinar el sistema para condiciones de vacío.

Se trabajó en el Laboratorio de plasmas para Energía de Fusión y Aplicaciones donde se encuentra actualmente el dispositivo experimental MEDUSA-CR, se inició con una inspección visual del sistema para condiciones de vacío utilizando el criterio de experto para determinar su estado. Posteriormente se planteó un diagrama para habilitar el sistema de vacío y se cotizaron todos los componentes necesarios con el proveedor Kurt J. Lesker Company <http://www.lesker.com/>. Se identificó también un procedimiento para desarmar el Tokamak y poder tener acceso a la cámara de vacío para su limpieza.

1.3 Examinar el sistema de inyección de gas a la cámara de vacío

Siguiendo la metodología planteada en la sección 1.2, se inició con una inspección visual del equipo MEDUSA-CR siguiendo el criterio de experto e identificando todos los componentes presentes vinculados al sistema de inyección de gas. Posteriormente se planteó un diagrama de componentes para habilitar el sistema de inyección de gas y se cotizaron todos los componentes necesarios con diferentes proveedores. Se planteó un diagrama para este sistema que incorpora el sistema de vacío indicado en la sección anterior, y se utilizó como guía técnica para el dispositivo la Referencia [6].

1.4 Examinar el sistema de control.

Se realizó una inspección visual en busca de los componentes de control siguiendo el criterio de experto, se planteó un posible diagrama del sistema de control, y se utilizó como guía técnica para el dispositivo la Referencia [6].

1.5 Examinar el sistema de calentamiento de plasmas.

Se realizó una inspección visual en busca de los componentes del sistema de calentamiento de plasmas siguiendo el criterio de experto, se planteó un posible diagrama del sistema identificando componentes necesarios, y se utilizó como guía técnica para el dispositivo la Referencia [6].

Objetivo Específico #2.

Determinar las necesidades para implementar el Tokamak Esférico MEDUSA-CR.

2.1 Determinar las necesidades de la fuente de alimentación de las bobinas

Siguiendo la metodología de la actividad 1.1 se identificó el tipo de cable necesario para reparar conexiones en los racks que almacena los capacitores. Se identificaron también alternativas al uso de capacitores, como por ejemplo el uso de transformadores. Se identificaron las necesidades para cada una de estas opciones para el sistema de alimentación. Se plantearon recomendaciones sobre las necesidades y se utilizó como guía técnica para el dispositivo la Referencia [6].

2.2 Determinar las necesidades el sistema para condiciones de vacío

Se identificaron componentes necesarios y se definió un diagrama de armado siguiendo el criterio de experto, estos se cotizaron con el proveedor Kurt J. Lesker Company <http://www.lesker.com/>. Se tomó en cuenta los componentes disponibles en el laboratorio mediante el uso del inventario disponible en el Laboratorio de Plasmas. Se realizaron recomendaciones para la limpieza de la cámara de vacío y se utilizó como guía técnica para el dispositivo la Referencia [6].

2.3 Determinar las necesidades el sistema de inyección de gas a la cámara de vacío

Utilizando la metodología de la actividad 1.3 se hizo un listado de los componentes faltantes, se planteó un diagrama de armado y se indicaron las recomendaciones de cambio de los componentes existentes que requieran un

cambio o requieran de mantenimiento utilizando como guía técnica para el dispositivo la Referencia [6].

2.4 Determinar las necesidades el sistema de control

Utilizando la metodología de la actividad 1.4 se identificó un posible diagrama de componentes, tomando en cuenta los equipos de control disponibles en el laboratorio.

2.5 Determinar las necesidades el sistema de calentamiento de plasmas

Utilizando la metodología de la actividad 1.5 se elaboró un listado de componentes necesarios para poder implementar el sistema de calentamiento de plasma y se identificó al menos un proveedor. Se identificaron las necesidades del sistema de calentamiento Óhmico y se dieron las recomendaciones pertinentes para esta actividad.

2.6 Determinar las necesidades de espacio físico para la instalación de MEDUSA-CR

Se identificaron las medidas generales de los subsistemas del dispositivo experimental MEDUSA-CR realizando visitas al Centro de Investigación en Vivienda y Construcción (CIVCO) donde se encuentra el banco de 3000 capacitores (1500 μ F, 450 VDC) y se trabajó en el Laboratorio de Plasmas para Energía de Fusión y Aplicaciones donde se encuentra actualmente el dispositivo experimental MEDUSA-CR y se determinó el espacio necesario que ocupa y se listaron las recomendaciones de seguridad que debe cumplir ese espacio.

Resultados

Sistema de alimentación de las bobinas

Esta sección muestra el estado actual del sistema de alimentación de las bobinas del Tokamak MEDUSA-CR. Además, se presentan las necesidades que tiene este sistema para funcionar adecuadamente.

Estado actual

Siguiendo la metodología indicada en el anterior capítulo, las pruebas a los capacitores indican estar en buen estado. Por otro lado, el banco de capacitores necesita de reparaciones en algunas conexiones, ya que las mismas se dañaron. Esto se puede solucionar consiguiendo materiales para reconstruirlo.



Figura 2. Bancos de capacitores de MEDUSA-CR.

En la actualidad el sistema de control de corriente no existe y es requerido diseñarlo. Finalmente, la inspección de las bobinas del dispositivo experimental indicó que se encuentran en buen estado, así como el material aislante.

A continuación se presentas en la figuras de la 1 a la 7 los resultados de las pruebas realizadas a los capacitores de carga y descarga del voltaje en función del tiempo:

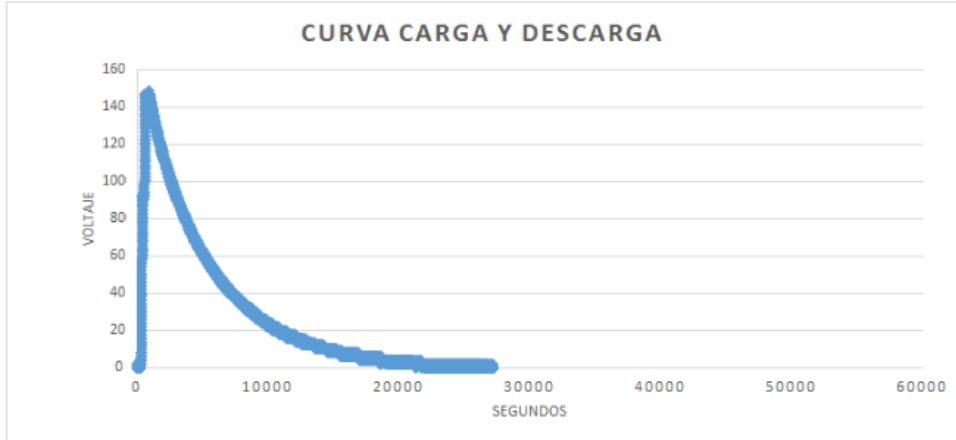


Figura 3. Curva de carga y descarga 1.

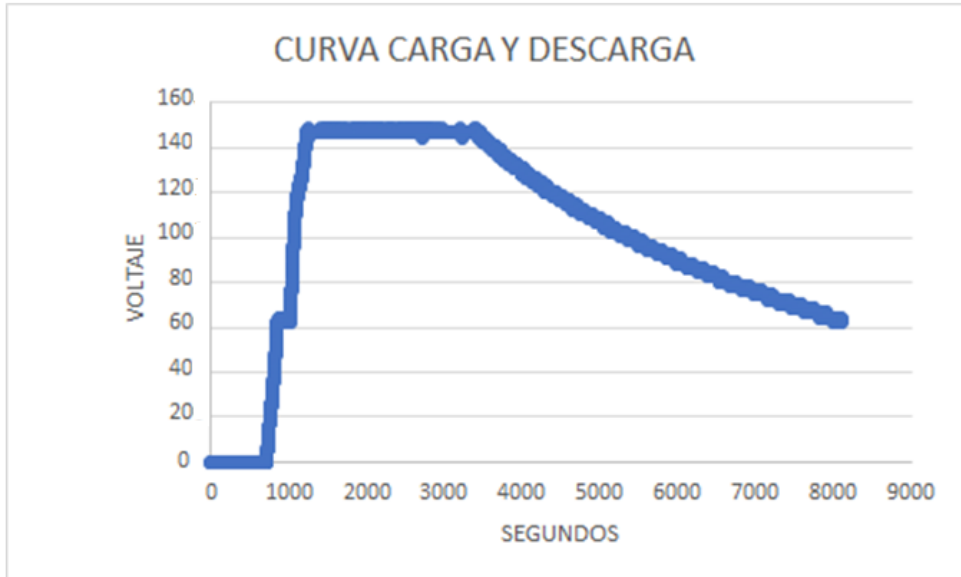


Figura 4. Curva de carga y descarga 2.

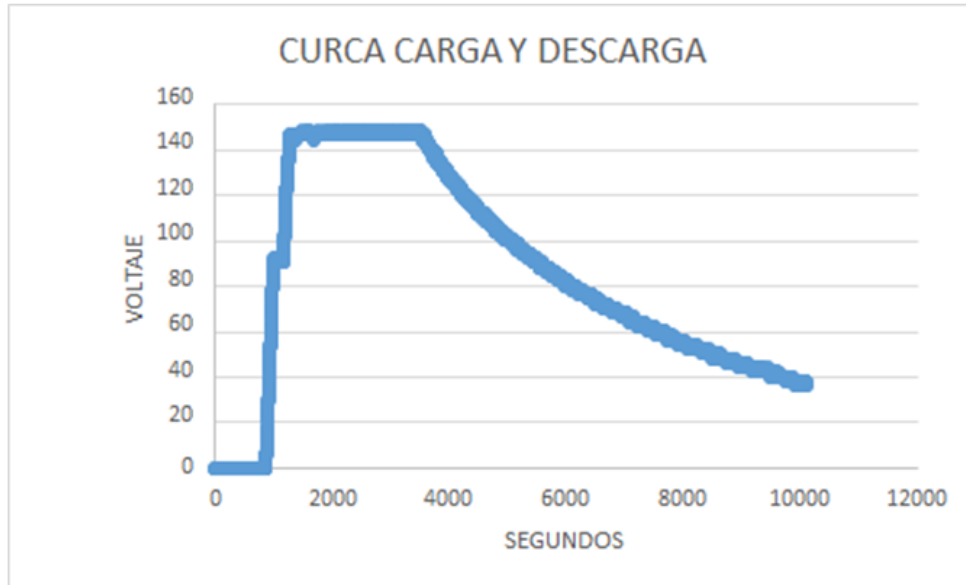


Figura 5. Curva de carga y descarga 3.

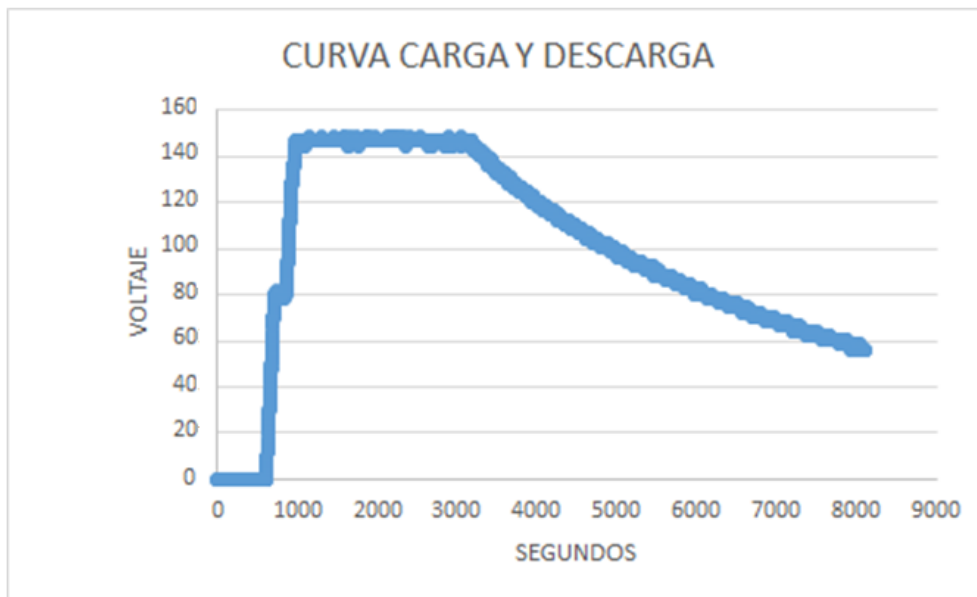


Figura 6. Curva de carga y descarga 4.

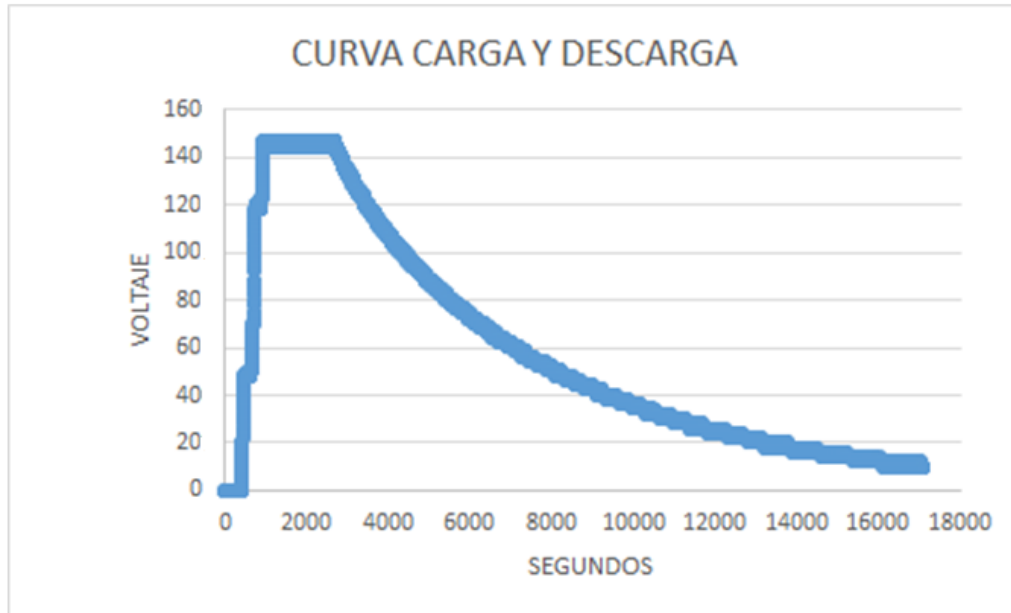


Figura 7. Curva de carga y descarga 5.

Cableado: Se presenta el cableado completo como se muestra en la figura 8 y 9. Las piezas están sucias, pero en buen estado. Ningún cable presenta falta de aislante y se presentan enrollados y categorizados por color.



Figura 8. Cableado de MEDUSA-CR.



Figura 9. Cableado de MEDUSA-CR.

Bobinas: Las bobinas se encuentran en buen estado y aún poseen buen recubrimiento aislante blanco como se muestra en la figura 10. Sin embargo, hay algunas bobinas externas (placas delgadas) un poco dobladas pero intactas.

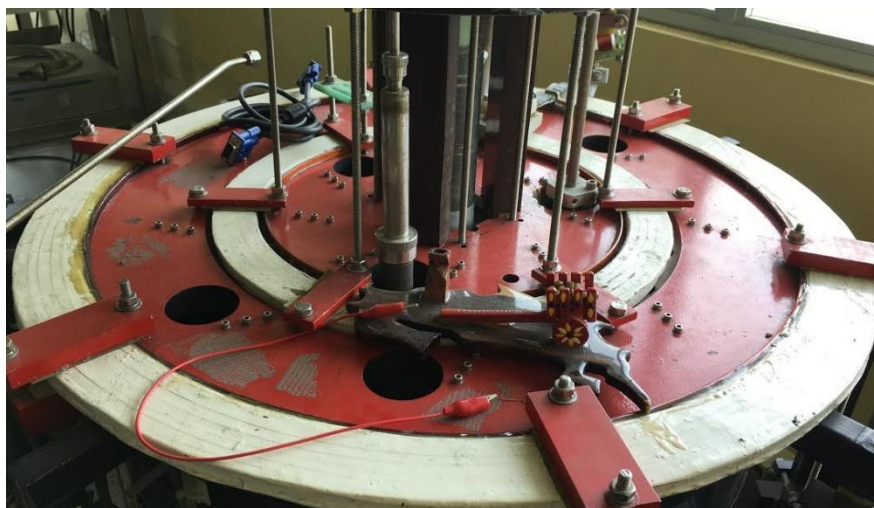


Figura 10. Superficie exterior de MEDUSA-CR.

Necesidades

Para poner a punto este sistema se recomienda comprar cable AWG número 12 para restablecer las conexiones en el banco de capacitores, así como estaño y una pistola de soldadura para componentes electrónicos.

Se identificó la posibilidad de utilizar el banco de transformadores ya existente en el Laboratorio de Plasmas, el cual no necesita ninguna modificación o mejora para ser utilizado como parte de la fuente de energía, esto reduciría el tamaño de los capacitores a utilizar.

Se debe diseñar un regulador de corriente eléctrica capaz de entregar la potencia necesaria al sistema. De igual forma en caso de que se utilice el banco de transformadores se debe de diseñar el regulador de corriente también. Para esto se debe hacer uso de la electrónica de potencia.

En el caso de utilizar el banco de capacitores se debe diseñar un sistema capaz de cargarlo, el cual debe conectarse a la red eléctrica y trabajar de manera conjunta con el sistema de descarga para que pueda deshabilitarse en el momento adecuado.

Sistema de condiciones de vacío

En esta sección se mencionará el sistema de vacío necesario para que opere el Tokamak MEDUSA-CR, así como el estado actual del sistema para luego indicar los equipos necesarios para ponerlo en operación. En la figura 11 se muestra en color rojo el diagrama para el sistema de vacío planteado en esta actividad de fortalecimiento una vez concluido la inspección visual. Cabe destacar que este es un producto de esta actividad.

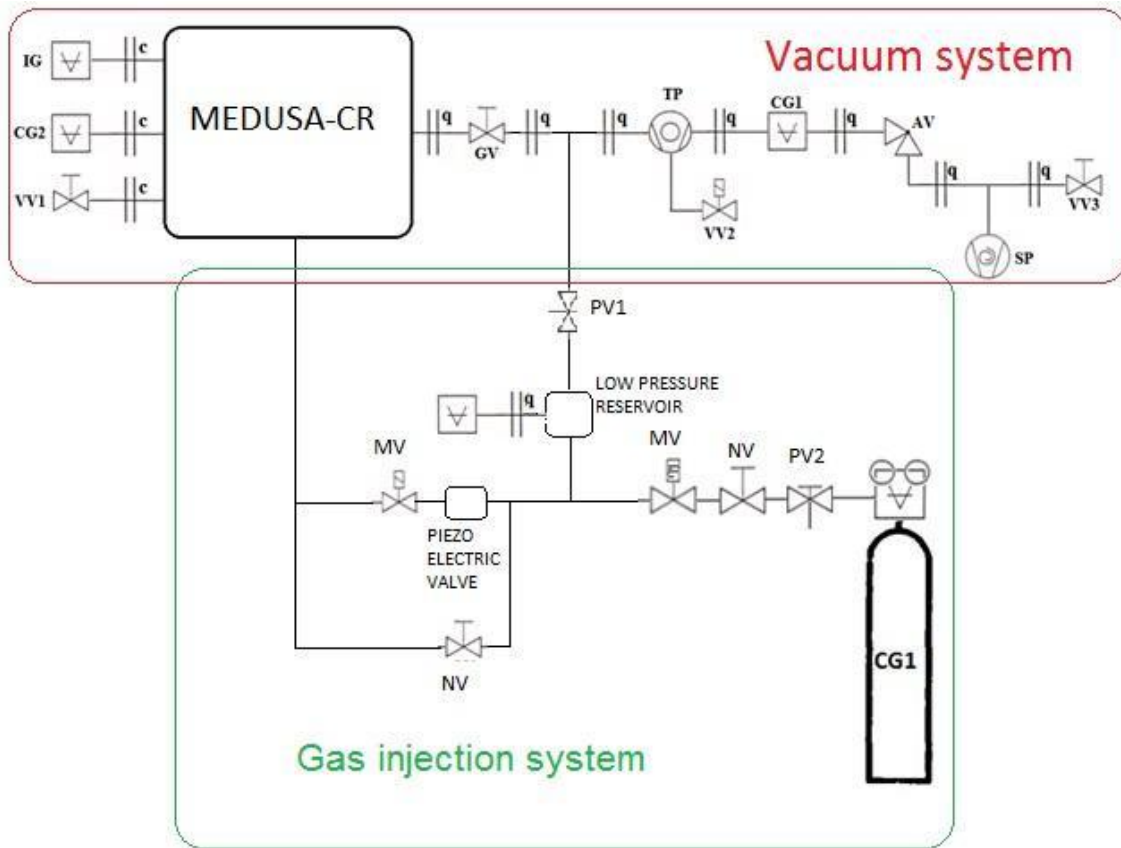


Figura 11. Sistema de vacío e inyección de gas del Tokamak MEDUSA.

Estado actual

La donación de MEDUSA solo comprendía la cámara de vacío (figura 12) y del banco de capacitores (figura 2). Es claro por este motivo que se requiere un sistema de vacío para su puesta en marcha.

Necesidades

- Bomba de vacío Scroll seca; la cual esta alimentada con 100-127 VA, 50/60 Hz, trifásica o monofásica. Con niveles bajo de ruido al operar. Con controlador de gas-ballast para manejar en las etapas del vacío la introducción de gas y condensación vapores en la bomba. La bomba debe de presentar una capacidad de bombeo por lo menos de 35 gr/h, un flujo de gas de 15 l/min.
(https://www.lesker.com/newweb/vacuum_pumps/pdf/manuals/xds%20manual.pdf)

- Bomba turbo molecular; Se requiere una que pueda trabajar con distintos gases y que logra alcanzar una vacío de al menos 5×10^{-5} tor. Preferible que presente compatibilidad con accesorios con norma ISO y de estándar KF para su instalación.
(http://www.lesker.com/newweb/vacuum_pumps/pdf/manuals/turbovac%2035%20to%201000c%20manual.pdf)
- Accesorios para la instalación; todos estos accesorios requeridos para la instalación de bombas de vacío y de sus conexiones deben de estar regidos bajo las normas ISO y los estándar KF en preferencia.

En las Figura 12 se muestra la cámara de vacío y algunos de sus puertos, que como se observa se encuentran en buen estado para su operación. Es importante resaltar que al estar expuestos a la atmósfera sin estar cubiertos se debe realizar una limpieza profunda de la cámara de vacío, con el objetivo de eliminar cualquier partícula de polvo que pueda llegar a dañar alguna bomba de vacío.



Figura 12. Fotos de la cámara de vacío del Tokamak MEDUSA-CR así como también de algunos de sus puertos.

Para realizar la limpieza se recomienda utilizar el procedimiento estándar. El cual se desarrolla utilizando acetona pura con un paño de microfibra y utilizando

guantes de látex para no contaminar con la suciedad de las manos el dispositivo. Para realizar la limpieza de la mejor manera se recomienda abrir la cámara de vacío por completo para tener un acceso ilimitado a su interior. Para ello se definió como producto de esta actividad el siguiente procedimiento para desarmar el Tokamak y poder tener acceso a la cámara de vacío para su limpieza.

Procedimiento de Desarme:

1. Se desacoplan los soportes rojos de las bobinas del campo vertical y de error: Para esto se debe desenroscar los tornillos y las tuercas de sujeción de los soportes (figura 13).

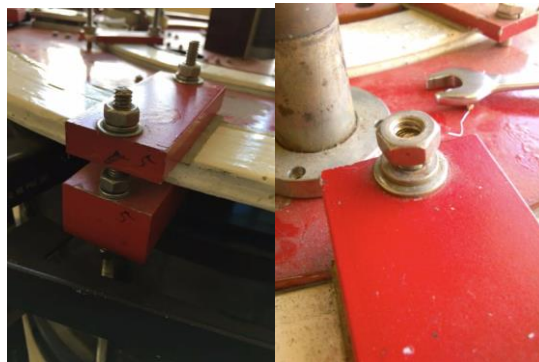


Figura 13. Procedimiento de desarme de MEDUSA-CR.

2. Se desmonta el "Top Hat": Para esto se debe desenroscar las tuercas y tornillos de sujeción y el tornillo central (figura 14).

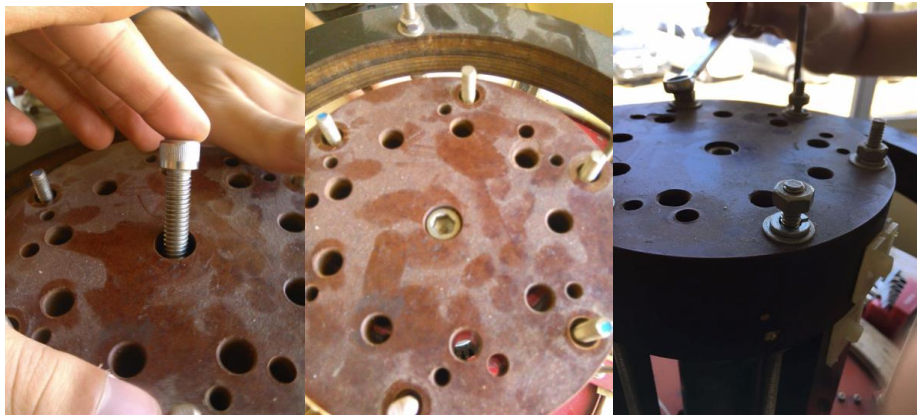


Figura 14. Procedimiento de desarme de MEDUSA-CR.

3. Se desmonta el OH Trim Coil: De igual manera, se desacoplan los tornillos

y sus respectivas roscas para desmontar el OH Trim Coil. Una vez que se saca esta parte, los soportes inferiores también se pueden desmontar (figura 15).

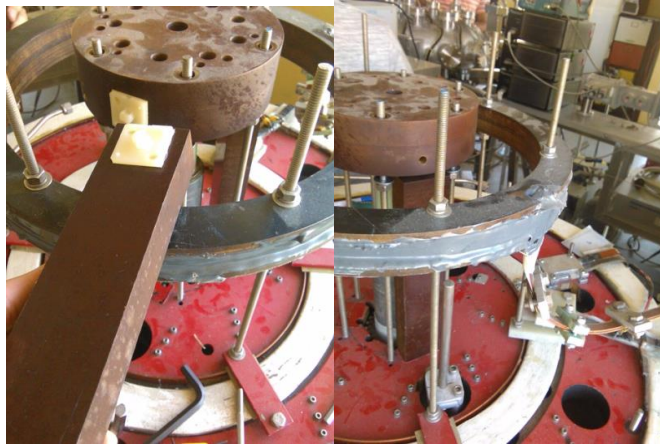


Figura 15. Procedimiento de desarme de MEDUSA-CR.

4. Desmontaje de la placa de Soporte Roja de *Garolite*: Se des roscan los tornillos de fijación con cabeza para llave Allen. Estos sujetan la placa de soporte con las bobinas TF (figura 16).



Figura 16. Procedimiento de desarme de MEDUSA-CR.

5. Se retira la lámina de sujeción de la entrada de corriente: Antes de levantar la placa de soporte superior de *Garolite*, se retiran las conexiones de la entrada de corriente a las bobinas. Para esto se desajusta la placa de presión y se deslizan las barras de cobre para que se despeguen del cableado principal de entrada de corriente (figura 17).



Figura 17. Procedimiento de desarme de MEDUSA-CR.

6. Se retira la placa superior roja de soporte: Una vez que se libera, esta puede desmontarse si se alza cuidadosamente (figura 18).



Figura 18. Procedimiento de desarme de MEDUSA-CR.

7. Se retiran los tornillos Allen de las bobinas TF: Cuando se tiene acceso debajo de la placa de soporte, se retiran los tornillos Allen que sostienen las bobinas TF con el núcleo o columna central de la estructura. Estos tornillos Allen tienen las mismas dimensiones que los desarmados en el punto 4 (figura 19).



Figura 19. Procedimiento de desarme de MEDUSA-CR.

8. Se desatornillan los pernos de fijación inferiores de las bobinas TF: Las bobinas TF, además de estar conectadas con el núcleo de la estructura, también se sujetan con su otra mitad por unos pernos localizados en la esquina inferior externa que también se deben desmontar (figura 20).



Figura 20. Procedimiento de desarme de MEDUSA-CR.

9. Se desmonta la mitad superior de las bobinas TF: Una vez que se desacoplan los pernos, se desmontan las mitades superiores de las bobinas TF. Con esto se tiene acceso a la tapa superior de vidrio de la cámara de vacío (figura 21).



Figura 21. *Procedimiento de desarme de MEDUSA-CR.*

10. Se desarma el sujetador plástico del núcleo para desmontar la tapa de vidrio: Cuando se tiene acceso a la tapa de vidrio, un sujetador de plástico evita el movimiento aleatorio de esta. Este sujetador se debe desarmar quitando los tornillos allen que se encuentran en las ranuras mostradas (figura 22).



Figura 22. *Procedimiento de desarme de MEDUSA-CR.*

11. Desmontaje de la tapa superior de vidrio: Cuando no hay más estructuras superiores, se puede desmontar la tapa de vidrio que no está adherida con pegamento a las paredes de vidrio de la cámara de vacío.

La parte interna de la cámara de vacío se encuentra en buen estado, pero sucia. No presenta quebraduras, ni ralladuras. El vidrio está intacto y a simple vista las pegaduras se encuentran en buen estado (figura 23).

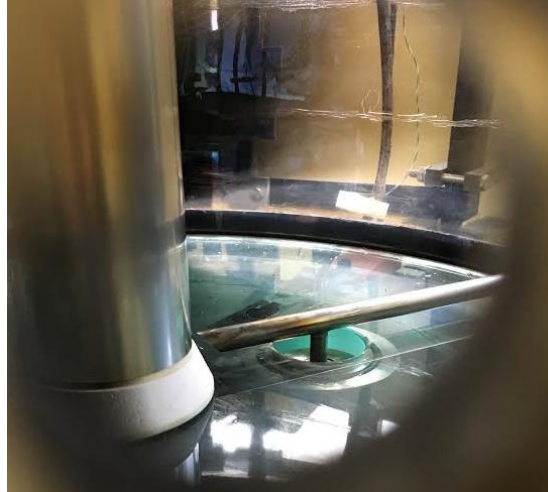


Figura 23. Parte interna de cámara de vacío de MEDUSA-CR.

Respecto a la estructura externa, no presenta óxido y se encuentra en excelente estado. En este caso, también se observa que está sucia (figura 24).



Figura 24. Estructura exterior de MEDUSA-CR.

La base de soporte se encuentra en buen estado, presenta pocas ralladuras y nada de óxido.



Figura 25. Base de soporte de MEDUSA-CR.

Entradas de las bombas de vacío: Como se puede observar en la figura 26, existen las previstas, pero hace falta conseguir el acople (de Conflat a KF40) que conecte la cámara de vacío a la entrada de la bomba.



Figura 26. Entradas de bombas de vacío de MEDUSA-CR.

Necesidades

Para poner en operación el sistema de vacío se requieren los siguientes componentes indicados en el cuadro 1 y deben ser ensamblados de acuerdo al diagrama de la figura 11. Esta lista se basa en el proveedor *Kurt J. Lesker Company* <http://www.lesker.com/>, el cual ha sido proveedor del Laboratorio de Plasmas y se conoce la calidad de sus productos. Cabe destacar que no es necesario comprarlos todos puesto que en el laboratorio ya existen equipos similares que pueden cumplir la misma función.

Cuadro 1. Componentes necesarios para la instalación del sistema de vacío.

Link	Precio	Nombre	Cantidad	Standard
https://www.lesker.com/newweb/vacuum_pumps/edwards-dry-scroll-vacuum-pumps.cfm	\$7,271.00	Edwards XDS5 Dry Pump nXDS10i	1	KF25
	\$12.00	Electrical Supply Cable, 2m No Plug	1	
	\$321.00	Exhaust Silencer (KF25)	1	
	\$326.00	Interface Cable, 2m	1	
	\$261.00	Tip Seal Kit	1	
	\$321.00	Exhaust Silencer (KF25)	1	
http://www.lesker.com/newweb/flanges/fittings_crosses.cfm?pgid=4waystd	\$162.00	Four way standard cross Flange 2-3/4"	3	KF25
http://www.lesker.com/newweb/flanges/flanges_kf_blank.cfm?pgid=flange1	\$9.30	Blank KF (QF) Flanges (304L SS)	1	KF25
	\$8.25	Centering Ring (SS with Fluorocarbon O-Ring)	12	KF25
https://www.lesker.com/newweb/flanges/hardware_kf_clamps_machined.cfm?pgid=al2	POR	Clamps	10	KF25
http://www.swagelok.com/en/catalog/Product/Detail?part=SS-1RS4&item=	NO REGISTRA	Stainless Steel Integral Bonnet Needle Valve,	1	N/A

		0.37 Cv, 1/4 in. SS-1RS4		
https://www.swagelok.com/downloads/webcatalogs/EN/MS-01-138.PDF	NO REGISTRA	QM Series (Canal de valvula de escape)	3	N/A
http://www.lesker.com/newweb/valves/inlinevalves_bellowssealed_ss_man.cfm?pgid=cfcopper	\$538.00	Manual Bellows Sealed SS Inline Valves (CF flanged; Copper bonnet)	1	KF25 Part No. SL0150MCCF
	\$26.40	OFHC Copper Gaskets for CF Flanges 2-3/4"	12	KF25 Part No. GA-0275
http://www.lesker.com/newweb/flanges/hardware_cf_gaskets.cfm?pgid=ofhc	\$29.40	OFHC Copper Gaskets for CF Flanges 3-3/8"	6	GA-0337
https://www.lesker.com/newweb/gauges/widerange_kjlc_392.cfm	\$1,033.00	2-3/4" CF / NW35CF Conflat®	1	KF25 + Cables
	\$280.00	KJLC 392 Replacement Sensor	2	
	\$291.00	KJLC 392 Replacement Sensor, 2-3/4" CF	2	
	\$112.00	Interconnect Cable	1	
	POR	Power Supply	1	
http://www.lesker.com/newweb/flanges/bellows_kf_hydraulicallyformed.cfm?pgid=unbraided	\$127.00	KF Flanged Bellows (Tubos Flexibles)	3	KF25 de 1.5m
http://www.lesker.com/newweb/flanges/adapters_flanged_1.cfm?pgid=cfkf	\$109.00	CF to KF (QF) Adapter Flanges	1	
http://www.lesker.com/newweb/flanges/hardware_cf_boltkits.cfm?pgid=6pt2	\$22.80	Hex Head Bolt Kits (Tapped Flanges) M6	2 set	Flnge size 2-3/4" HBKM6X25
http://www.lesker.com/newweb/flanges/hardware_cf_boltkits.cfm?pgid=6pt2	\$22.80	Hex Head Bolt Kits (Tapped Flanges) M8 DN160CF	2 set	HBKM8X45
http://www.lesker.com/newweb/flanges/flanges_cf_316ss.cfm?pgid=2d75in	\$58.00	2-3/4" O.D. CF Flanges	8	All 2-3/4" (DN35-DN40CF) Flanges Part No. F0275N000NLN
http://www.lesker.com/newweb/flanges/adapters_flanged_1.cfm?pgid=cfkf	\$29.40	1/4 Hard OFHC Copper Gasket		All 3-3/8" (DN50CF) Flanges art No. GA-0337

http://www.lesker.com/newweb/vacuum_pumps/turbo_pump_leybold_tmp_standard.cfm	\$7719.3	ATP150 (Adixen Turbo Pump) (ISO100-K or 6" CF (DN100CF))	1	
http://www.lesker.com/newweb/flanges/fittings_cf_nipples.cfm?pgid=reducer2	\$140.00	Conical Reducer Nipple 2-3/4" to 3-3/8"	1	(Esta pieza está presente en el SCR, no se sabe si para el Sistema de vacío de tokamak también lo requiere
http://www.lesker.com/newweb/flanges/adapters_flanged_1.cfm?pgid=cfkf	\$75.00	CF to KF (QF) Adapter Flanges	1	Esto para el acople del Sistema a la entrada del tokamak
http://www.lesker.com/newweb/valves/gatevalves_standard_ss_man_iso.cfm?pgid=0	\$1,422.00	Manual SS Gate Valves (KF & ISO flanged) KF40	1	SG0150MVQF
	POR	Anti-Seize Thread Lube	1	VZTL-4OZ
	\$25.00	Bolt Kit M10-35 for ISO160 "F" Flanges (8/pkg)	1	HBKM10X35-8
	\$86.00	Centering Ring (SS/AL with Fluorocarbon O-Ring) For ISO160 Flanges (1/pkg)	1	QF160-SAVR
	POR	Clamp - Aluminum Cast (KF40)	1	QF40-150-C
	\$7.00	Double Clamps (AL) For ISO160 - ISO250 "K" Flanges (1/pkg)	1	QF-SDC-AL2
	\$12.50	Fluorocarbon Centering Ring KF40	1	QF40-150-SRV
	\$5.70	Single Camp (AL) KF40	1	QF-MSC-ALM
http://www.lesker.com/newweb/flanges/flanges_cf_doublefaced.cfm?pgid=0	\$50.00	Double-Faced CF Flanges DN35CF-DN40CF	8	DFF275X000

http://www.lesker.com/newweb/flanges/flanges_cf_doublefaced.cfm?pgid=0	\$175.50	Double-Faced CF Flanges 6"	8	DFF600X000
---	----------	----------------------------	---	------------

Sistema de inyección de gas

Como producto de esta actividad se planteó un nuevo diagrama para el sistema de inyección de gas para el Tokamak MEDUSA-CR que se muestra en la figura 27. Como se observa este sistema debe de ir enlazado al sistema de vacío, la razón de esto es para asegurar que el gas inyectado sea lo más puro posible.

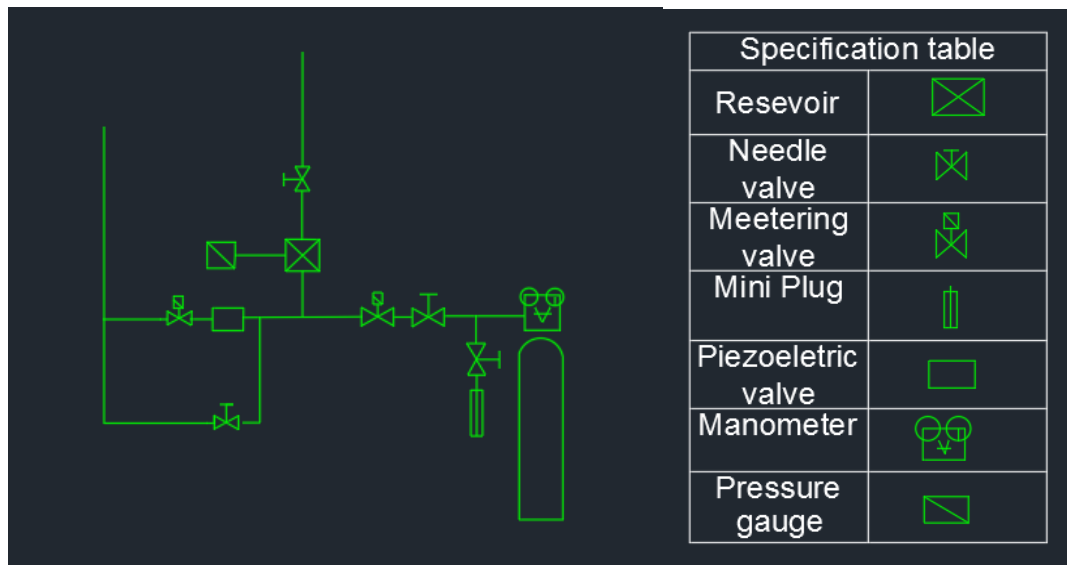


Figura 27. Sistema de inyección de gas de MEDUSA-CR.

En esta sección se muestra el estado actual del sistema, así como también la lista de componentes necesarios para su puesta en marcha.

Estado actual

El Tokamak MEDUSA-CR cuenta con un pasamuros de gas, el cual es mostrado en la figura 28. Este se puede utilizar, pero con la salvedad de que es imperativo limpiarlo con el procedimiento estandarizado para vacío, así como también revisar constantemente el avance de la herrumbre que presenta en la parte exterior. Este pasamuros también cuenta con pines eléctricos los cuales están en buen estado para su uso. Cabe destacar que para los equipos que se

tienen este pasamuros eléctrico no es necesario para iniciar operación, pero a futuro será un componente muy útil.



Figura 28. Pasamuros de gas de MEDUSA-CR.

Las entradas para inyección de gas se encuentran en buen estado y no presentan grietas estructurales. Presentan sus respectivas piezas de acople. Todas contienen los *O-Rings* a excepción de una de las entradas laterales, como se muestra a continuación.



Figura 29. Entrada para inyección de gas de MEDUSA-CR.

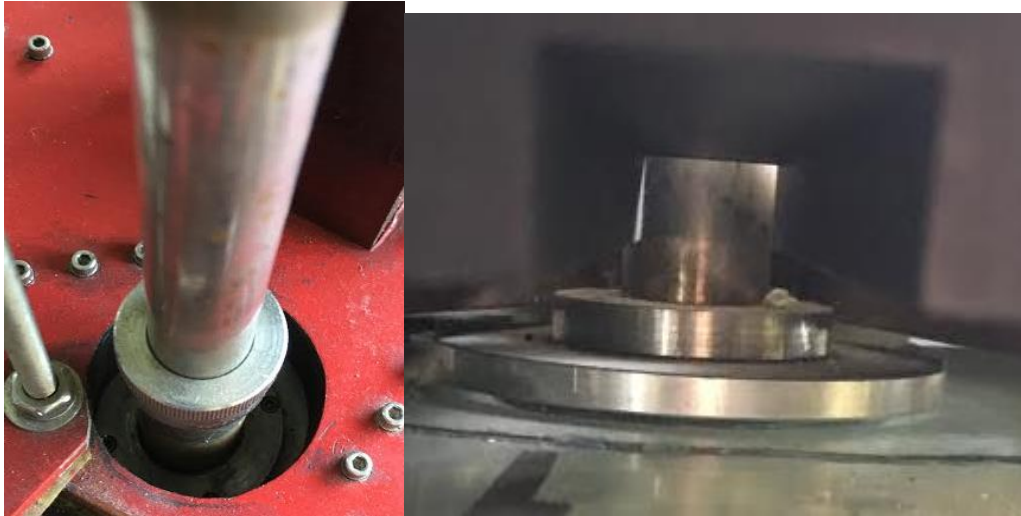


Figura 30. Entrada para inyección de gas de MEDUSA-CR.



Figura 31. Acople y colocación del pasamuros de MEDUSA-CR.

Necesidades

Para poner en operación el sistema de inyección de gas se requiere los componentes indicados en el Cuadro 2. Una vez que se tengan todos los componentes se deben ensamblar como se muestra en la figura 27 y el sistema se vería como lo muestra la figura 32.

El diagrama de componentes propuesto para el sistema de inyección de gas es un producto de esta actividad.

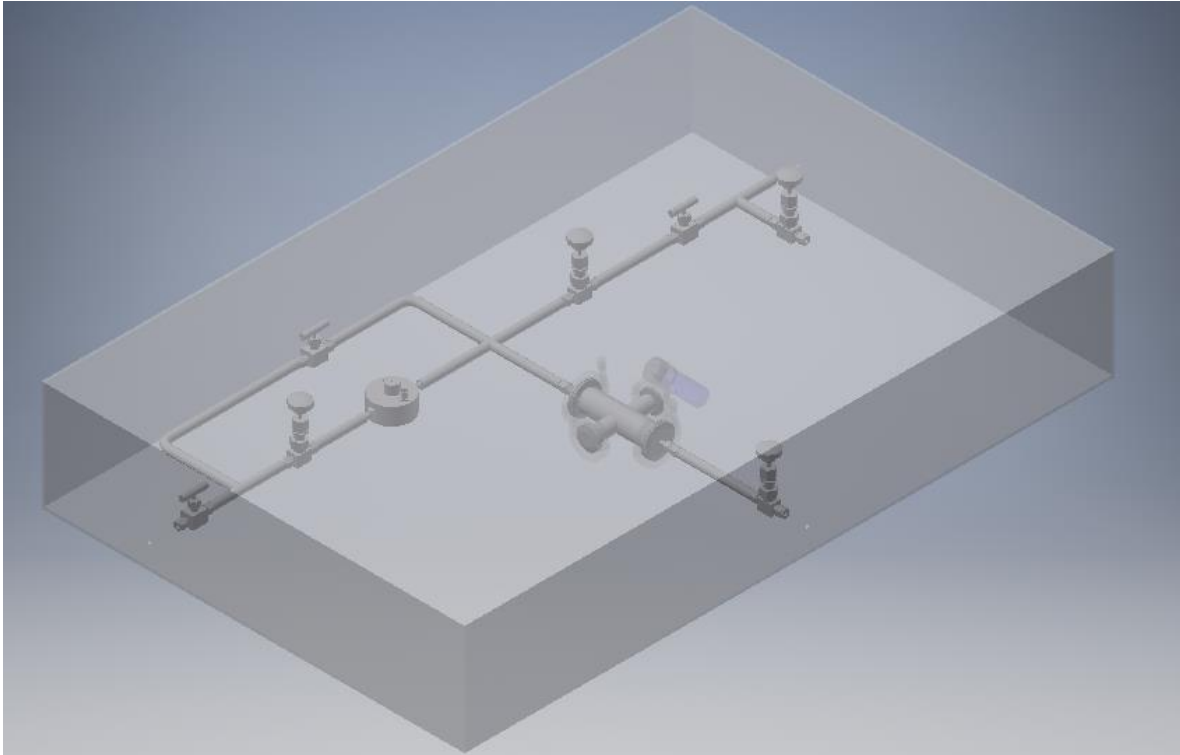


Figura 32. Sistema de inyección de gas de MEDUSA-CR.

Como se muestra en la figura 32 se tomó la decisión de ensamblar el sistema de inyección de gas en una caja de acrílico para facilitar su uso, colocación, ensamblaje y movilidad en diversos experimentos.

Las especificaciones técnicas mínimas que requieren los componentes más importantes que conforman el sistema de inyección son;

- *Gauge Tube*, el cual posea un rango de medición al menos de 10-4 Torr a 1,000 Torr. (<http://www.lesker.com/newweb/gauges/pdf/manuals/275usermanual.pdf>)
- Control de *gauge tube*; que sea compatible con el *gauge tube* que se disponga en cuanto a rango y conectividad. Una alimentación de 12 a 28 Vdc. (<http://www.lesker.com/newweb/gauges/pdf/manuals/375usermanual.pdf>)
- *Metering valve*; valvula de ¼, con capacidad de trabajar con 5000 PSI (<https://www.swagelok.com/en/catalog/Product/Detail?part=SS-31RS4>).
- *Needle valve*; con capacidad de de ¼ , 6000 PSIG @ 100°F /413 BAR @

37°C. (<https://www.swagelok.com/en/catalog/Product/Detail?part=SS-20VS4>)

- Piezo eléctrica; la cual trabaje con 24V dc, 30 mA, mayor de 55 kΩ. Se puede manejar un modelo con características neumáticas de entre 2 a 17 bar y de un flujo nominal entre 600 y 100 l/min. (<http://www.hoerbiger.com/en-0/files?level1=1&level2=431&level3=139&oldlevel=1%2C431%2C139&filelang=es>)

Cuadro 2. Componentes necesarios para la instalación del sistema de inyección de gas.

Partes	Costo		Costo Total	Link
	Unitario	Cantidad		
Reservorio	\$375	1	\$375	http://www.lesker.com/newweb/flanges/fittings_iso_crosses.cfm?pgid=4way
Double Clamps ISO 63	\$6.50	1	\$6.5	
Centering Ring ISO 63	\$48.60	1	\$48.6	
Convectron (KJLC Gauge Tube)	\$164	1	\$164	http://www.lesker.com/newweb/gauges/convectron_kjlc_4.cfm
Gauge Tube				
Controller	\$508	1	\$508	
Interconnect Cable	P.C	1		

Turbo pump	\$4,889	1	\$4,995	
Plug cable	\$44	1	\$44	http://www.lesker.com/newweb/vacuum_pumps/turbopump_varian_turbov.cfm
Pump controller	\$1,520	1	\$1,520	
Metering valve	\$486	2	\$972	https://www.swagelok.com/en/catalog/Product/Detail?part=SS-31RS4
Needle valve	\$367	3	\$1,101	https://www.swagelok.com/en/catalog/Product/Detail?part=SS-20VS4
Purge valve	\$214	2	\$428	https://www.swagelok.com/en/catalog/Product/Detail?part=SS-BVM4-SH
Matrices	\$130	2	\$260	http://www.lesker.com/newweb/gas_liquid_management/fluidfeedthroughs_matrices.cfm#fragment-1
Piezoelectric		1		http://www.hoerbiger.com/en-3/pages/139
				http://www.capovani.com/m.cfm?menuid=m_9_2_1
			TOTAL	

			\$10,422	
--	--	--	----------	--

Sistema de control

En esta sección se hablará del sistema de control del Tokamak MEDUSA-CR, tanto en su estado actual y las necesidades para ponerlo a funcionar.

Estado actual

El Laboratorio de plasmas del Tecnológico de Costa Rica cuenta con una plataforma de desarrollo PXIe, específicamente un sistema NI_PXIe-8135 y distintos módulos para el control y adquisición de señales en los experimentos que se realizan. Se tiene disponible un módulo con 32 entradas y 32 salidas digitales alimentadas de forma externa y optoacopladas para niveles lógicos industriales (NI-PXI-6414), una interfaz serial de 16 puertos de alto rendimiento (NI-PXI-8430) y 3 módulos de adquisición de datos simultáneos con E/S analógicas y digitales de distintas capacidades además de contadores y temporizadores para señales de PWM o disparo analógico/digital (NI-PXIe6363).

El Tokamak MEDUSA-CR no cuenta con ningún componente de control, por lo que en este momento es necesario implementarlo de nuevo.

Necesidades

Para este sistema de control se recomienda utilizar el equipo NI PXIe-1085 de *National Instruments* con el que ya cuenta el laboratorio de plasmas y que para las necesidades del sistema es suficiente (figura 33).

En su defecto si se requiere comprar un equipo nuevo debe cumplir con las siguientes características:

- 16 canales simultáneos, entradas analógicas diferenciales 1.25 MS/s/ch 16

- bits de resolución con un rango de ± 10 V
- 4 canales de salidas analógicas a 3.33 MS/s 16 bits de resolución con un rango ± 10 V
- 48 líneas de I/O digitales : 32 canales con 10 MHz hardware-timed
- 4 contadores/timers con 32-bits for PWR, encoder, frecuencia, etc.
- Triggering digitales y analógicos y tiempos con tecnología NI-STC3.
- Windows 7/Vista/XP/2000.



Figura 33. Equipo NI PXIe-1082 para sistema de control de MEDUSA-CR.

Para que se ejecute adecuadamente la secuencia de disparo se puede programar utilizando la licencia de *LabVIEW* disponible también en el laboratorio y el cual es compatible con el hardware adquirido. En caso de que se desee usar otro hardware se puede programar en lenguaje C, el cual es gratuito. Se planteó un posible diagrama de control que se muestra en la siguiente figura.

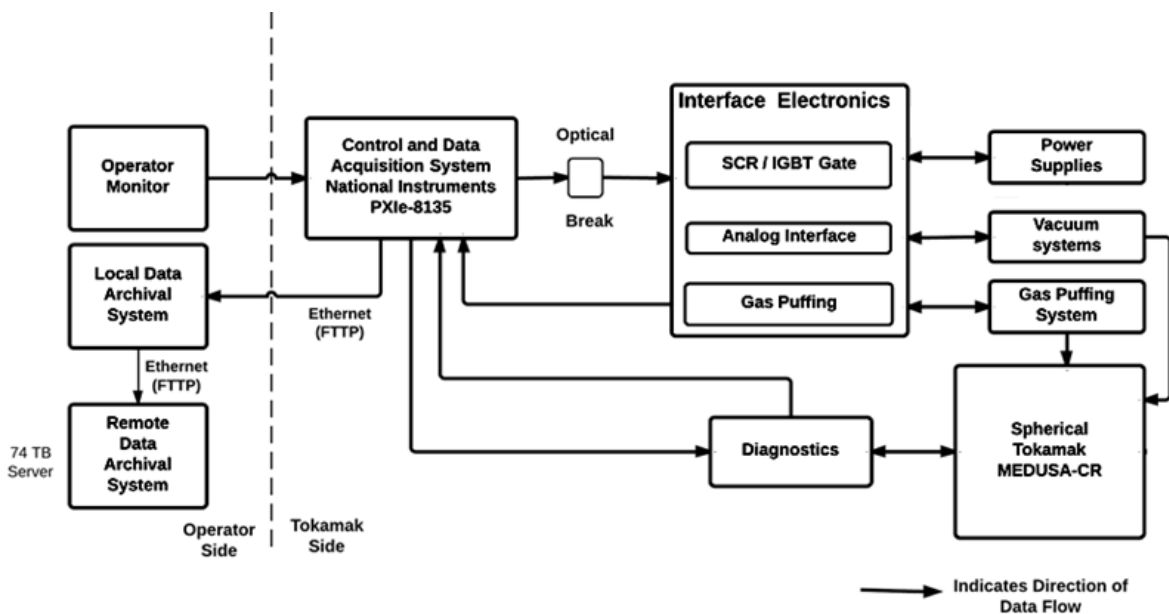


Figura 34. Diagrama de control de MEDUSA-CR.

Sistema de calentamiento de plasma

En esta sección se hablará del sistema de calentamiento de plasma necesario para poner en operación el Tokamak MEDUSA-CR.

Estado actual

El dispositivo MEDUSA-CR no cuenta con ningún componente del sistema de calentamiento ECR. Pero cuenta con el sistema de calentamiento Óhmico. El cual consiste en una bobina en el interior del núcleo. Para su alimentación se utiliza el banco de capacitores o el banco de transformadores antes descritos.

Necesidades

Para este equipo se requiere comprar un sistema de calentamiento ECR a una frecuencia de 5.5 GHz, el cual debe contar con los siguientes componentes como mínimo:

- Magnetron de 5.5 GHz similar al VTC-5763A de la empresa CPI (<http://www.cpii.com/product.cfm/1/17/110>, <http://www.cpii.com/docs/datasheets/110/VTC5763A.pdf>)
- Aislador, con guía de onda estándar WR 187.
- Sensor de potencia entregada y potencia reflejada, con guía de onda estándar WR 187.
- Guía de onda estándar WR 187, del tamaño necesaria para que se acerque al Tokamak.
- Antena de salida, la cual debe de diseñarse para su óptimo trabajo.

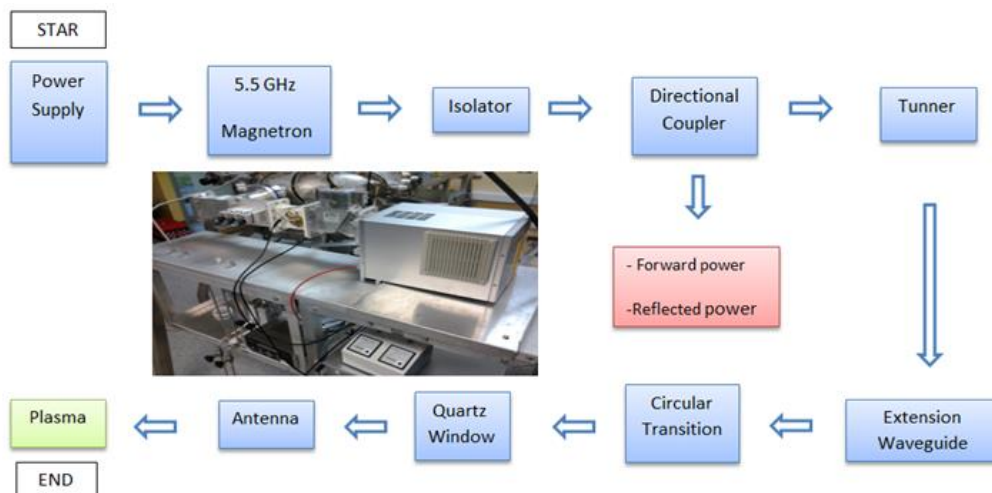


Figura 35. Sistema de calentamiento de plasma de MEDUSA-CR.

Para el sistema de calentamiento Óhmico se requiere de un control de corriente para la descarga de los capacitores o en su defecto controlar la corriente aplicada del banco de transformadores. Para esto se recomienda hacer uso de la electrónica de potencia como base para su diseño.

Espacio físico.

El espacio requerido para el experimento MEDUSA-CR se divide en dos secciones principales: fuente de alimentación y el Tokamak. El área que ocupa la fuente es de 30 metros cuadrados los cuales incluye el sistema de carga y descarga de los capacitores. Este es el caso más grande por lo que si se selecciona cualquier otra opción en esa área se puede acomodar.

El Tokamak con el sistema de vacío, el sistema de inyección de gas, el sistema de calentamiento ECR y dos diagnósticos requiere de un espacio de 28 metros cuadrados. Se debe de agregar al menos 10 metros cuadrados para los operadores del Tokamak.

Discusión y conclusiones

Con el desarrollo de esta actividad se logró examinar el estado de los diferentes sistemas del tokamak esférico MEDUSA-CR, así como se determinó las necesidades para implementar este dispositivo. A pesar de que los resultados indican que el banco de capacitores se encuentra en buen estado, el lograr plantear una solución alternativa para la alimentación de las bobinas del dispositivo MEDUSA, permite pensar en la posibilidad de descartar el uso de los 3000 capacitores y utilizar un sistema de transformadores permitiendo esto contar con un sistema más estable sin correr riesgos en el uso de un banco de capacitores con más de 15 años de no uso. La actividad de fortalecimiento fue más allá de lo planteado inicialmente, pues permitió diseñar nuevos diagramas para el sistema de vacío y el sistema de inyección de gas lo que permitió la formulación de la propuesta de proyecto de investigación titulada “Implementación y simulación del tokamak esférico MEDUSA-CR: Etapa 1”, actualmente en ejecución que busca dentro de sus objetivos implementar estos nuevos diagramas y habilitar por completo los sistemas de vacío e inyección de gas. Es allí donde los resultados de esta actividad permitieron identificar el listado de componentes y sus precios para habilitar estos sistemas permitiéndole al proyecto actual hacer solicitudes de presupuesto muy bien fundamentadas en los resultados de esta actividad. Tener claridad también sobre la ausencia de sistemas en el equipo MEDUSA, así como los equipos necesarios con sus especificaciones técnicas permite disponer de información valiosa para plantear proyectos de investigación posteriores que implementen los sistemas ausentes en la actualidad.

Como conclusión esta actividad logró identificar el estado actual de los diferentes sistemas en el Tokamak Esférico MEDUSA-CR desde el punto de vista de ingeniería. Así mismo se determinaron las necesidades para implementarlo al plantear mejoras para el funcionamiento del dispositivo y obteniendo listados de componentes por comprar. Esta actividad demuestra entonces la viabilidad de poner en funcionamiento este Tokamak abriendo el camino para futuros proyectos de investigación.

Recomendaciones

- Se recomienda abordar la implementación del proyecto MEDUSA-CR en un plazo mínimo de 6 años, tiempo en el cual se implementen los subsistemas por separado.
- En el diseño del sistema de regulación de corriente eléctrica se debe de utilizar conceptos y componentes de electrónica de potencia, los cuales usen estrategias con una alta eficiencia en la regulación.
- El espacio físico debe ser diseñado de manera tal que los operarios estén protegidos y que permita la operación del dispositivo de manera segura. Para lo cual se recomienda asesorarse con un especialista del tema.

Referencias

- [1] Wolf R.C., A Tokamak Reactor Based on Advanced Concepts, Transactions of Fusion Science and Technology, Vol. 49, Feb 2006.
- [2] Onjena J. and Van Oost G., Energy for future energy source, Transactions of Fusion Science and Technology, Vol. 49, Pages. 3-15, Feb 2006.
- [3] Weynants R.R., Fusion machines, Transactions of Fusion Science and Technology, Vol. 49, Pages. 36-42, Feb 2006.
- [4] ITER Organization, What is ITER?, 2017. (Online). Available: <http://www.iter.org/>
- [5] Peng, Y.-K. M., and Strickler, D. J., Nuclear Fusion, 26, Page. 769, 1986.
- [6] G. D. Garstka, PhD thesis, University of Wisconsin at Madison, 1997.
- [7] Guadamuz S. et al., Propuesta de proyecto de investigación titulado “Implementación para investigación en plasmas como futura fuente de energía del dispositivo de confinamiento magnético de tipo Tokamak esférico llamado MEDUSA en Costa Rica”, Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2013-2014