

**Tecnológico de Costa Rica**

**Escuela de Ingeniería en Electrónica**

**Programa de Maestría en Ingeniería en Electrónica**



**Sistema de control de corriente de las bobinas del Tokamak MEDUSA-CR**

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Master en Ingeniería en electrónica con énfasis en sistemas empotrados**

**Presentada por:**

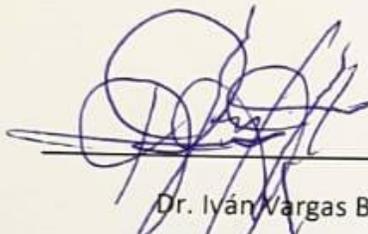
**Jaime Alonso Mora Meléndez**

**Cartago, Mayo de 2018**

Instituto Tecnológico de Costa Rica  
Escuela de Ingeniería Electrónica  
Tesis de Maestría  
Tribunal evaluador

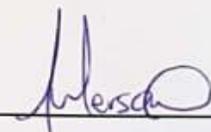
Tesis de maestría defendida ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el grado académico de maestría, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal



---

Dr. Iván Vargas Blanco  
**Profesor lector**



---

Máster Jeferson González Gómez  
**Profesor lector**



---

Dr. Carlos Meza Benavidez  
**Director de Tesis**

Los miembros de este Tribunal dan fe de que la presente tesis ha sido aprobada y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica.

Cartago, 02 de mayo de 2018.

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, al utilizar y aplicar información de literatura referente al tema y al introducir conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, indiqué las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Jaime Mora Meléndez

Cartago, Costa Rica

Céd: 1-1416-0518

**Abstrac**

---

This report presents the design of the current control of the coils of the Spherical Tokamak MEDUSA-CR. Which, is divided into two subsystems: the energy storage system and the discharge system. Both are in charge of transferring the energy from the electrical grid to the coils of the Spherical Tokamak MEDUSA-CR.

At the same time, a bibliographic review about the spherical Tokamaks will be presented, and about the possibility of converting the Spherical Tokamak MEDUSA-CR into the first spherical Tokamak in the world to work in alternating current mode, allowing to perform experiments of long discharges.

**Keywords:**

---

Fusión, Spherical Tokamak MEDUSA-CR, current control, Alternating current.

## **RESUMEN**

---

EL presente informe presenta el diseño de los circuitos de potencia propuestos para controlar la corriente de las bobinas del Tokamak Esférico MEDUSA-CR. El cual, se divide en dos subsistemas: el sistema de almacenamiento de energía y el sistema de descarga. Ambos están encargados de trasegar la energía desde la red eléctrica hasta las bobinas del Tokamak Esférico MEDUSA-CR.

A su vez se va a presentar una revisión bibliográfica sobre los Tokamaks esféricos, y sobre la posibilidad de convertir el Tokamak Esférico MEDUSA-CR en el primer Tokamak esférico del mundo en trabajar en modo corriente alterna, permitiendo realizar experimentos de descargas de larga duración. Antes de este trabajo no se ha planteado esta posibilidad, por lo que abre un nuevo abanico de posibilidades el implementar lo que esta tesis plantea.

### **Palabras clave:**

---

Fusión, Tokamak Esférico MEDUSA-CR, control de corriente, corriente alterna.

## Indicie

<b>Indicie de figuras .....</b>	<b>viii</b>
<b>Indicie de tablas.....</b>	<b>x</b>
<b>Capítulo 1: Introducción.....</b>	<b>1</b>
Motivación .....	1
Objetivo General.....	2
Objetivos Específicos .....	2
Restricciones .....	2
Supuestos .....	3
Contribuciones .....	3
Glosario y Acrónimos .....	3
<b>Capítulo 2: Control de corriente en dispositivos de fusión .....</b>	<b>5</b>
2.1 Fusión nuclear .....	5
2.2 Confinamiento magnético.....	8
2.3 Tokamak esférico.....	12
2.4 Operación del Tokamak esférico .....	14
2.5 Modo de corriente alterna .....	18
2.7 PID con algoritmo de velocidad .....	19
2.6 Sliding mode control.....	22
<b>Capítulo 3: Diseño propuesto .....</b>	<b>24</b>
Sistema de potencia .....	24
Sistema de almacenamiento de energía .....	24
Sistema de descarga .....	27
<b>Capítulo 4: Selección del empotrado y control del sistema.....</b>	<b>32</b>
Diseño del control.....	32
Control del convertidor de corriente BUCK.....	32
Control del puente H.....	34
Selección del sistema empotrado.....	38

Implementación de una prueba de concepto .....	39
Resultados de la prueba a pequeña escala .....	41
<b>Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones.....</b>	<b>43</b>
Conclusiones .....	43
Preguntas por contestar.....	43
Recomendaciones .....	44
<b>Bibliografía .....</b>	<b>45</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>48</b>
Anexo 1 .....	48
Anexo 2.....	54

## Indicie de figuras

Figura 1 Reaccion de fucion entre deutrio y tritio (imagen obtenida de energía-nuclear.net) ...	5
Figura 2 Fusion reaction cross-sections de las diferentes reacciones de fusión (tomado de [3]) .....	6
Figura 3 SCR-1 magnetic configuration schematic.....	7
Figura 4 Dibujo CAD del Tokamak esférico MEDUSA-CR .....	8
Figura 5 Estados de la Materia (tomada de plasmainnova.com) .....	9
Figura 6 Camino helicoidal que siguen las partículas de un plasma ante un campo magnético (tomado de [8]) .....	9
Figura 7 Corriente en el sentido poloidal (color rosado) genera el campo magnético toroidal (color negro) .....	10
Figura 8 Configuración del solenoide central en un tokamak. Bobinas toroidales y campo magnético toroidal en color rojo. Bobina del primario y corriente del plasma en color verde. Campo magnético resultante en color azul. (Imagen obtenida del Instituto de Recherche sur la Fusion Magnétique). .....	11
Figura 9 Líneas de campo magnético de bobinas de equilibrio vertical de ST MEDUSA-CR.	12
Figura 10 Forma del plasma de un Tokamak Convencional (imagen superior). Imagen de la forma de un plasma de un Tokamak esférico (imagen inferior) (tomada de [13]).....	13
Figura 11 Tokamak Esférico MEDUSA-CR.....	14
Figura 12 Secuencia de generación de fusión en un Tokamak Esférico .....	15
Figura 13 Descarga pulsada comparada a una descarga AC .....	19
Figura 14. Forma de la respuesta de la planta para poder aplicar el método de ziegler-nichols de lazo abierto.....	20
Figura 15 Forma de la respuesta de la planta para poder aplicar el método de Ziegler-Nichols de lazo abierto.....	22
Figura 16. Superficie de deslizamiento y como el sistema intenta mantenerse sobre la superficie. .....	23
Figura 17. Diagrama eléctrico del sistema de potencia del sistema de almacenamiento de energía .....	25

Figura 18. Sistema de control para cambiar los bancos de paralelo a serie.....	25
Figura 19 Curva de carga de los bancos de capacitores del Tokamak Esférico MEDUSA-CR27	
Figura 20. Circuito de potencia para las bobinas de campo toroidal y el sistema ohmic .....	28
Figura 21. Circuito de potencia para las bobinas de campo vertical. ....	28
Figura 22. Curva de corriente, tensión, control y descarga del banco de capacitores para el sistema OH sin la resistencia auxiliar. ....	29
Figura 23. Curva de corriente, tensión, control y descarga del banco de capacitores para el sistema OH con la resistencia auxiliar .....	29
Figura 24 Corriente de salida y tensión de salida para el sistema de descarga de las bobinas de campo vertical.....	31
Figura 25. Respuesta al impulso del convertidor BUCK propuesto.....	33
Figura 26. Convertidor BUCK simulado en PSIM, lo cual incluye el control PID con algoritmo de velocidad. ....	34
Figura 27. Salida de corriente del convertidor BUCK con el control PID con algoritmo de velocidad implementado. ....	34
Figura 28. Diagrama eléctrico para obtener el modelo matemático de la planta.....	35
Figura 29. Puente H con el control implementado en C.....	37
Figura 30. Curva resultante de la simulación con el control propuesto.....	38
Figura 31. Diagrama eléctrico del circuito planteado para la prueba de concepto. ....	40
Figura 32. Diagrama del circuito acondicionador de señal de salida del sensor de corriente ..	41
Figura 33. Prueba de concepto implementada y en funcionamiento .....	41
Figura 34. Curva de corriente experimental de la prueba de concepto (Línea Continua) comparada con la curva de la simulación (línea punteada) .....	42

## Indicie de tablas

Tabla 1 Parámetros de diseño y operación del Tokamak Esférico MEDUSA-CR .....	14
Tabla 2 Métodos de calentamiento para Tokamak esféricos [15] .....	16
Tabla 3 Comparación entre los métodos de operación. [15] .....	16
Tabla 4. Forma de la respuesta de la planta para poder aplicar el método de ziegler-nichols de lazo abierto.....	21
Tabla 5. Bancos de capacitores para el sistema de almacenamiento de energía. ....	26
Tabla 6. Parámetros de las bobinas del Tokamak Esférico MEDUSA-CR.....	27

## Capítulo 1: Introducción

---

### Motivación

La energía es uno de los elementos claves de la humanidad. En el mundo la demanda de energía crece año con año y es vital asegurar una constante entrega de energía para suplir la demanda. Cerca del 80% de la energía producida se logra con los combustibles fósiles.

Según la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés) la demanda de energía se incrementará en un 37% para el 2040 (IEA, 2017). Con esta situación, llega una iniciativa mundial para encontrar una nueva fuente de energía limpia, renovable e inagotable. Los proyectos más ambiciosos están enfocados en desarrollar los reactores termonucleares de fusión para obtener esa nueva fuente de energía.

En la naturaleza los procesos de fusión se dan naturalmente en las estrellas, las cuales utilizan su gran fuerza de gravedad sumado a una temperatura de quince millones de grados Celsius para sobreponerse a las fuerzas de repulsión en los átomos. Las estrellas utilizan el hidrogeno, para formar helio después del proceso de fusión.

El mayor reto proviene del hecho de que en la tierra no se puede replicar la fuerza de gravedad de las estrellas, para lo cual se desarrollaron dos tipos de dispositivos el Stellarator y el Tokamak. Estos llevan el plasma a una temperatura de ciento cincuenta millones de grados Celsius y logran desarrollar los procesos de fusión nuclear. Estos equipos se conocen como dispositivos de confinamiento magnético.

Costa Rica se une a este esfuerzo por la búsqueda de una nueva fuente de energía gracias al grupo de Investigación en Plasmas y sus Aplicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica, el cual nace en setiembre de 2008 como iniciativa del científico costarricense Dr. Iván Vargas Blanco, experto en Física de Plasmas y Fusión Nuclear. Mediante un convenio realizado entre el Instituto Tecnológico de Costa Rica y el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas de España (CIEMAT) se inicia la investigación en fusión nuclear en Costa Rica.

Actualmente el Grupo de Investigación en Plasmas y sus Aplicaciones cuenta con un laboratorio equipado para trabajos de investigación en plasmas industriales y fusión nuclear. Uno de los proyectos está implementando el dispositivo de confinamiento magnético de tipo Tokamak llamado Medusa-CR (Madison EDUcation Small Aspect ratio Tokamak de Costa Rica). El cual fue comprado a la *University of Wisconsin-Madison* por \$ 1 (un dólar) según el “*Used Equipment Sales Agreement*” firmado por ambas partes. Así mismo se cuenta con un Stellarator diseñado y construido en Costa Rica en total operación. Estos dos dispositivos son para investigación en fusión nuclear. Además, el grupo de investigación cuenta con 10 investigadores, así como también cerca de 20 estudiantes de ingeniería y física, principalmente del ITCR y la UCR.

El dispositivo Medusa-CR se encuentra en un proyecto adscrito a la VIE titulado “Implementación y simulación del Tokamak esférico MEDUSA-CR: Etapa 1” el cual pretende poner en funcionamiento el dispositivo en un periodo de 6 años en 3 etapas, actualmente está en la etapa 1, la cual pone a funcionar el sistema de vacío, el sistema de inyección de gas, así como diseñar el sistema de control de corriente de las bobinas del Tokamak medusa. Además, pretende realizar diferentes simulaciones del dispositivo con el fin de lograr un mejor entendimiento y determinar parámetros para su operación.

El poner a funcionar el Tokamak Medusa-CR conlleva una gran complejidad, esto se debe a que muchos de sus componentes están viejos, o ya no los tiene del todo. Esto implica realizar un rediseño, el cual se aprovecha para actualizar en lo más posible con nuevas tecnologías.

Uno de los sistemas críticos que tienen los dispositivos de confinamiento magnético son las bobinas, las cuales se encargan de generar el campo magnético que confina el plasma y a su vez le da su forma.

Para lograr este objetivo se necesita un sistema que mantenga la corriente de acuerdo con un valor fijado por el usuario y se encargue de mantenerlo de esta forma durante el tiempo necesario, de igual manera debe de tener un tiempo de asentamiento de 50  $\mu$ s ante un cambio en el valor fijado.

Este sistema va a ir de la mano de la fuente de energía que se utilice. Por lo cual, se debe definir la fuente de alimentación a utilizar y esta debe ajustarse al espacio físico, y cumplir cualquier requerimiento de seguridad para operar.

### **Objetivo General**

Diseñar un sistema de control de corriente para las bobinas del Tokamak Medusa-CR.

### **Objetivos Específicos**

- Diseñar tres reguladores de corriente directa para cada uno de los juegos de bobinas del Tokamak.
- Diseñar los algoritmos de control de las plantas de los objetivos anteriores.
- Determinar el sistema empotrado adecuado para la aplicación propuesta.

### **Restricciones**

La principal restricción de este proyecto es que las bobinas del Tokamak esférico MEDUSA-CR ya están diseñadas y no hay intención de modificarlas. Por consiguiente, el sistema de regulación de corriente debe ajustarse a estas condiciones.

Por otro lado, al momento de realizar esta tesis se está en la fase de construcción del edificio donde estará este dispositivo y aun no se sabe dónde será su ubicación ni dónde estará su acometida de alimentación.

Sin duda una de las más grandes restricciones es el tamaño del dispositivo, al ser calificado como pequeño, el espacio para las bobinas es limitado; esto implica que la forma de manufactura está acorde con las restricciones físicas del dispositivo.

### **Supuestos**

Se asume en el desarrollo de esta tesis que se cuenta con un transformador trifásico capaz de suministrar la cantidad de energía necesaria para una descarga del Tokamak. Así mismo, se asume que el edificio donde estará ubicado tiene todas las facilidades para su instalación y operación.

Se asume, que no hay restricción en el presupuesto para comprar de equipos distintos a la acometida de la red electrica con la que cuenta el edificio.

Además, se asume que la máxima corriente que el dispositivo puede soportar es la que dictan los conductores de cada una de las bobinas. Por tanto, no importa cuanta corriente es la que necesite el investigador estará limitado por la corriente máxima que el conductor puede soportar antes de destruirse.

### **Contribuciones**

La principal contribución de esta tesis es de convertir el Tokamak esférico MEDUSA-CR en el primero en el mundo en operar en modo AC. Por consiguiente, se va a poder realizar estudios en materiales y afrontar problemas de control en el estado estacionario en el Tokamak. Los cuales tienen una relevancia ante la comunidad científica porque los problemas para utilizar la fusión como futura fuente energía se deben principalmente a retos tecnológicos y de ingeniería para hacer esto realidad.

Esto permite además extender las fronteras de la investigación en dispositivos para fusión nuclear, lo cual convertiría a Costa Rica en un pionero en descargas de larga duración en dispositivos Tokamak esféricos. Y así, obtener en un futuro energía eléctrica de una forma limpia, renovable e inagotable pues utiliza como combustible el elemento más abundante en la tierra.

Además, le permitirá al Tecnológico de Costa Rica impulsar la investigación en fusión que ha venido desarrollando y lograr su objetivo primordial: la creación de recurso humano bien capacitando en las tecnologías de plasma.

### **Glosario y Acrónimos**

AC- Corriente Alterna

MHD- Magnetohidrodinámica

FEM- Fuerza Electromotriz

eV- Electrón Volts

MEDUSA-CR- Madison EDucational Small-Aspect-ratio Tokamak

SMC *Sliding Mode Control*

### 2.1 Fusión nuclear

El objetivo de la investigación en fusión es desarrollar la tecnología necesaria para producir energía al imitar las estrellas, las cuales unen dos átomos y como resultado se obtiene un átomo más pesado y a su vez se produce una gran cantidad de energía. En la Figura 1 se muestra una de las reacciones existentes para hacer entre un átomo de deuterio y un átomo de tritio, ambos isotopos del hidrógeno. Estos liberan una gran cantidad de energía, así como helio y neutrones.

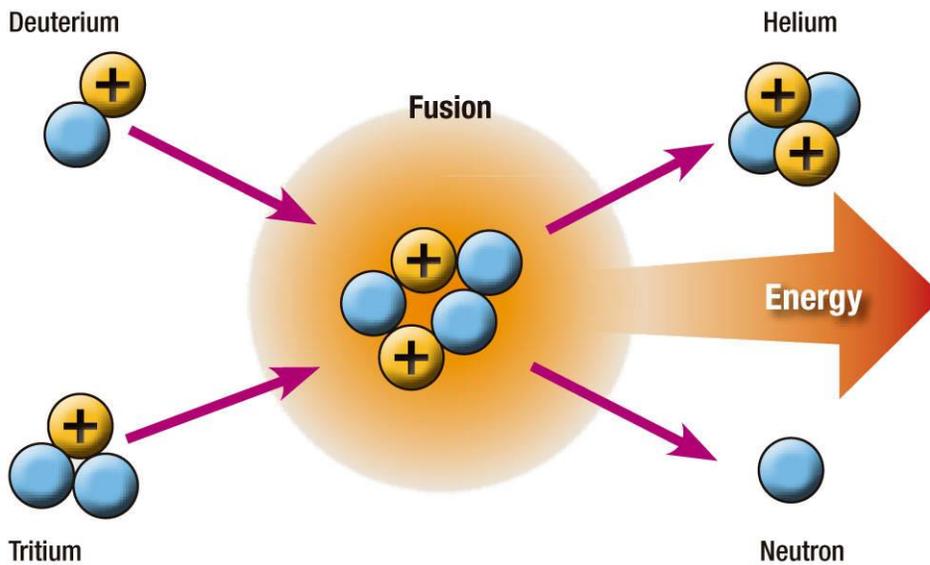
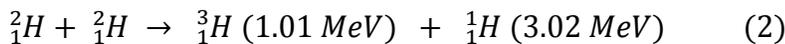
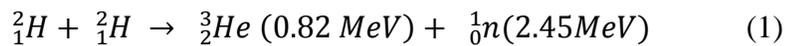


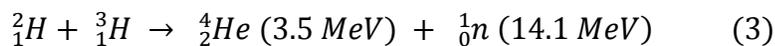
Figura 1 Reaccion de fucion entre deutrio y tritio (imagen obtenida de energía-nuclear.net)

Existen varias formas de producir reacciones de fusión entre dos átomos de bajo peso atómico [1], algunas de esas posibles reacciones son:

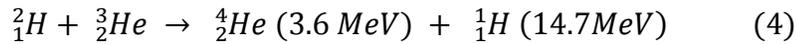
Deuterio-deuterio



Deuterio-tritio



### Deuterio-Helio 3



De las tres reacciones, la de mayor potencial es la deuterio-tritio. Esto se debe a que la masa de los neutrones es cuatro veces más pequeña que el núcleo helio-4. Gracias a la conservación del movimiento, el helio-4 resultante de la reacción de fusión tendrá alrededor de un quinto de la energía y el neutrón tendrá la energía remanente, es decir cuatro quintos.

Para determinar que la reacción 3 es la más conveniente se debe aclarar el concepto de sección eficaz (*Fusion reaction cross-sections*): una cantidad para el análisis de las reacciones de fusión, la cual mide la probabilidad de que un par de partículas reaccionen entre sí. [2]. En la Figura 2 se puede apreciar las diferentes gráficas del *fusion reaction cross-sections* y se observa como la reacción de deuterio-tritio tiene mayor probabilidad de que estas partículas se fusionen.

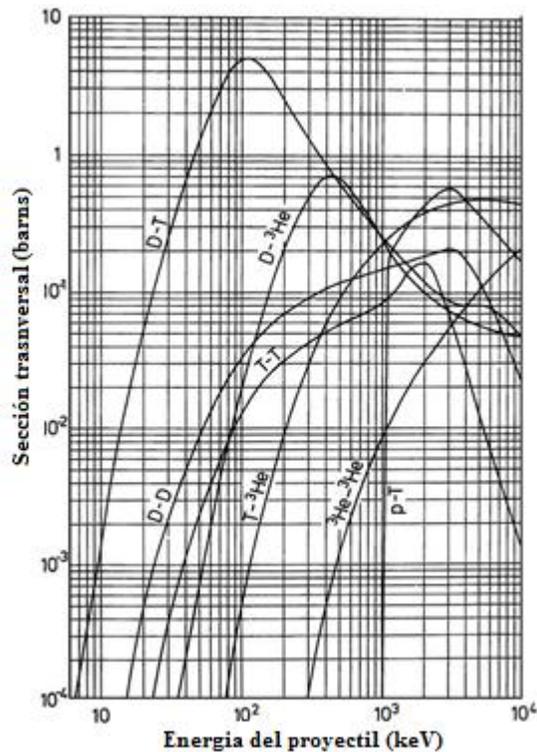


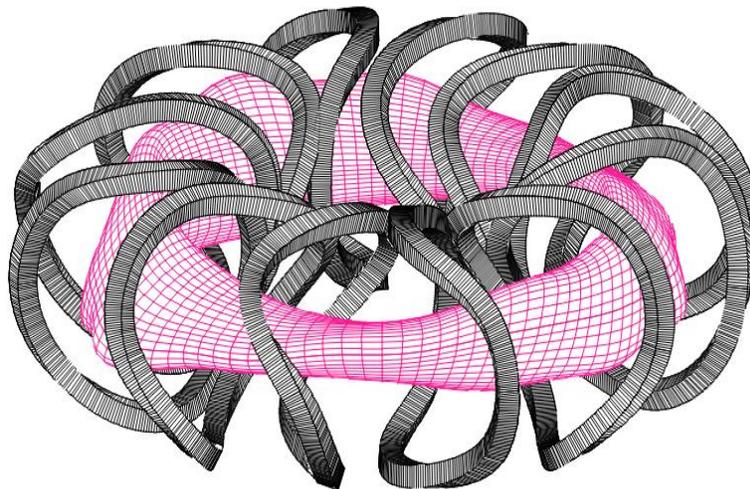
Figura 2 *Fusion reaction cross-sections* de las diferentes reacciones de fusión (tomado de [3])

El combustible para esta reacción se puede obtener en la Tierra, dado que deuterio es muy común y se puede encontrar en el agua de mar: cerca de 1 parte por 5000 de hidrógeno en el agua es deuterio. El tritio por otro lado no es tan común en el agua de mar, su concentración es mucho menor que la del deuterio. En vista de eso la alternativa es formarlo a partir del litio, más concretamente con el litio-7 o el litio-6.

Al tener claro cuál es la mejor reacción de fusión y donde encontrar el combustible, es necesario entender cómo se puede obtener las condiciones necesarias para entrar al estado de ignición. Para esto, se requiere que el producto triple alcance un valor mayor o igual a  $5 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ s KeV}$  al combinar la temperatura del plasma, la densidad del plasma y el tiempo de confinamiento. Esto siempre y cuando se tenga una mezcla de partes iguales de tritio y deuterio. Un ejemplo de esto es el Tokamak JET que alcanzó un valor de  $n\tau T$  superior a  $1 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ s KeV}$ . [4].

En la tierra no se puede realizar fusión como lo hacen las estrellas, puesto que no existe forma de obtener la misma fuerza de gravedad de estas. Como resultado, se utilizan dispositivos de confinamiento magnético. Existen dos familias de dispositivos: los Tokamaks y los Stellarators. Tokamak es un acrónimo en ruso que significa cámara toroidal con bobinas magnéticas, mientras que Stellarator significa generador estelar. Dentro de los Tokamaks podemos encontrar los Tokamaks convencionales y los Tokamaks esféricos. En la familia de los Stellarators podemos encontrar los Torsatron, Modular, Heliac, Heliotron y Helias. [5]

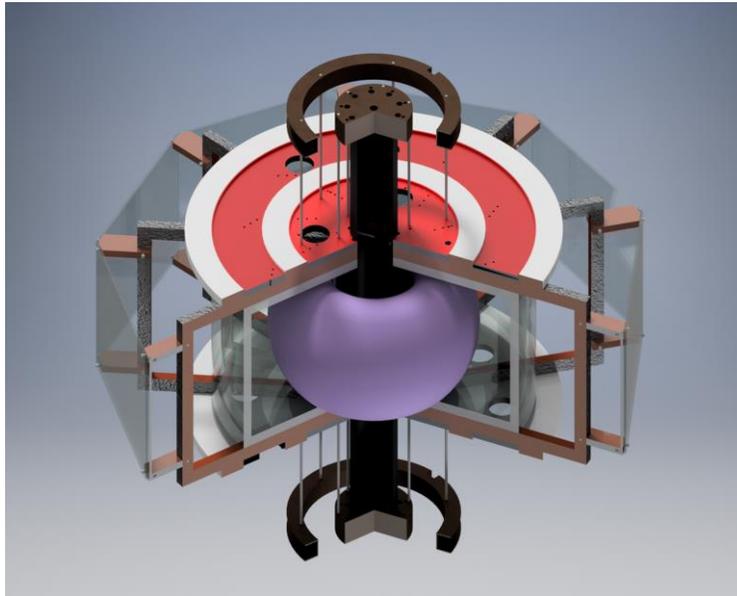
Los Stellarator presentan una alta complejidad de construcción, debido a la forma de sus bobinas, como se aprecia en la Figura 3 en color negro. Además, no requieren una corriente en el plasma para el confinamiento lo cual los hace muy estables.



*Figura 3 SCR-1 magnetic configuration schematic*

Por otro lado, los Tokamaks y los Tokamaks Esféricos consisten en un juego de bobinas toroidales hechas alrededor de la cámara de vacío para crear el campo magnético toroidal. A su vez, el solenoide central crea una corriente en el plasma para generar un campo magnético definido por la regla de la mano derecha. Y finalmente las bobinas poloidales crean el campo magnético poloidal, el cual se usa para controlar la posición y la forma del plasma. Su principal

ventaja es el su relativa facilidad de construcción por la simpleza de sus bobinas, a diferencia del Stellarator.



*Figura 4 Dibujo CAD del Tokamak esférico MEDUSA-CR*

## **2.2 Confinamiento magnético**

El plasma es uno de los cuatro estados de la materia, y como los demás estados se puede obtener al calentar el anterior. En la Figura 5 se aprecia el modelo de cómo se observarían los distintos estados de la materia. El plasma se obtiene calentado un gas hasta que sus partículas se ionizan. Dado que el plasma tiene más energía que el gas, este va a ocupar el volumen del recipiente que lo contenga, pero transfiere la energía a la pared y hace que las partículas pierdan su energía. De hecho, para lograr los procesos de fusión se requiere que estas partículas no pierdan energía, y esto se logra al confinar las partículas. [6] [7]

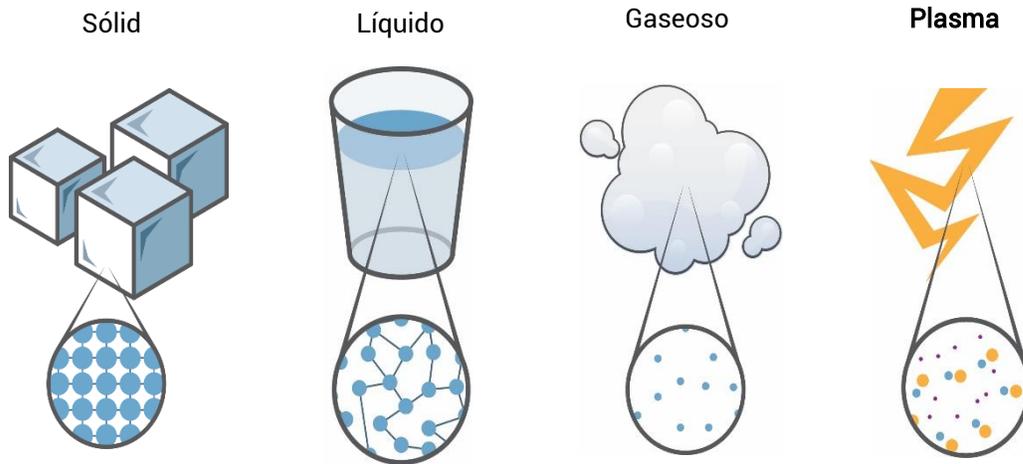


Figura 5 Estados de la Materia (tomada de [plasmainnova.com](http://plasmainnova.com))

Existen tres formas para confinar un plasma: con la fuerza de gravedad, tal como lo hacen las estrellas, con confinamiento magnético como en los dispositivos Stellarator y Tokamak, y por confinamiento inercial.

En el caso de confinamiento magnético se aprovecha la composición de las partículas cargadas del plasma, las cuales van a interactuar con los campos magnéticos como se observa en la Figura 6. Esta interacción del campo magnético uniforme y las partículas cargadas permite que las últimas sigan el campo magnético en forma espiral, debido a la fuerza de Lorentz [7]. Gracias a la geometría específica del campo magnético se evita que las partículas toquen las paredes y pierdan energía.

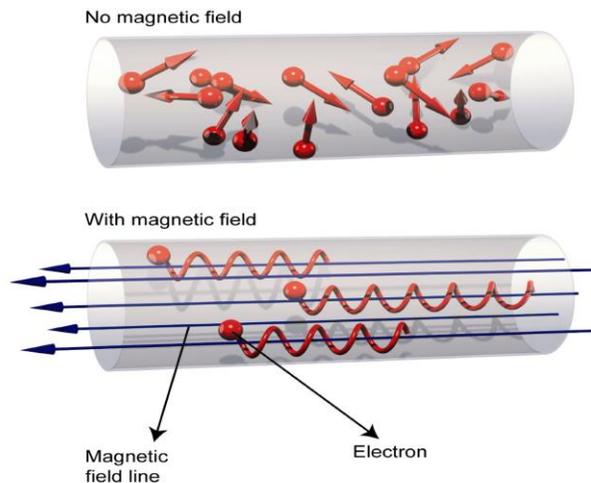


Figura 6 Camino helicoidal que siguen las partículas de un plasma ante un campo magnético (tomado de [8])

Los Tokamaks con su forma de toroide y las bobinas generan el campo magnético para alcanzar el equilibrio. El equilibrio en un plasma de fusión esta descrito por el modelo Magnetohidrodinámica (MHD) [8]. La importancia de la forma toroidal es que el campo magnético se cierre en un círculo, lo cual crea un camino infinito para confinar las partículas. Para poder conseguir ese campo magnético toroidal se debe crear bobinas en las cuales circule la corriente en forma poloidal como se observa en la Figura 7.

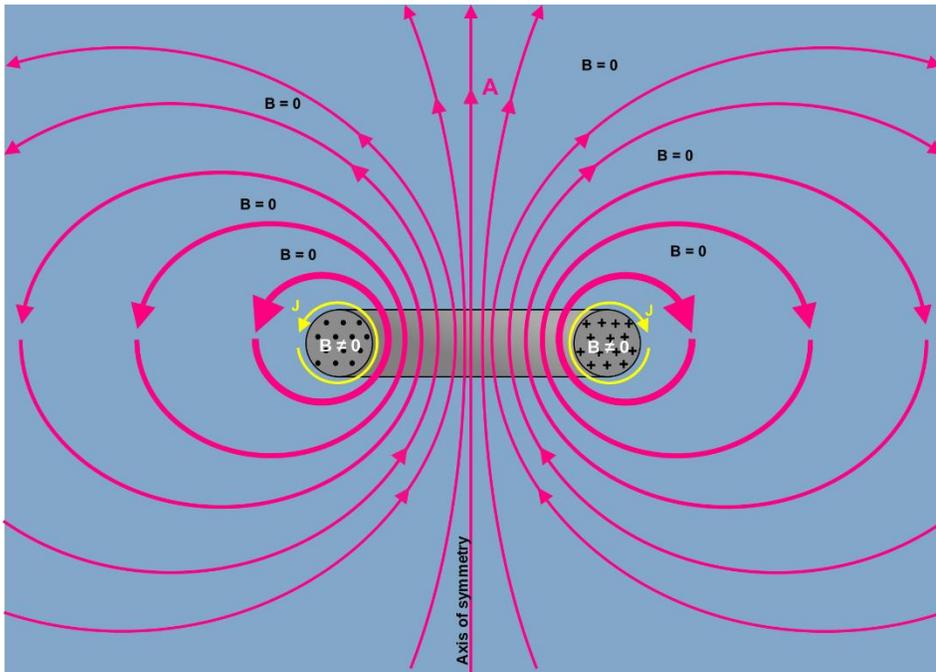


Figura 7 Corriente en el sentido poloidal (color rosado) genera el campo magnético toroidal (color negro)

Al lograr que el campo magnético se cierre en un círculo se puede inducir una corriente en el plasma al aplicar el principio de Faraday, el cual puede ser descrito por la ecuación de Maxwell-Faraday. Estas ecuaciones describen que para crear la suficiente fuerza electromotriz (FEM) en las partículas del plasma en un lazo es necesario tener un flujo magnético variante dentro de la superficie correspondiente de las partículas del plasma. Por consiguiente, se crea el campo magnético variante, gracias al cual las partículas del plasma tendrán la FEM para acelerarse en su movimiento toroidal, lo cual genera la corriente del plasma.

En un Tokamak la corriente de plasma es inducida gracias un solenoide central, este arreglo es conocido como solenoide central. Esta configuración se puede apreciar en la Figura 8, este esquema es equivalente al de un transformador convencional, con la salvedad de que el secundario es el plasma. El primario se comporta como un transformador convencional, en el cual la corriente del secundario es manejada por las variaciones en la bobina primaria. La

diferencia fundamental entre un Tokamak y un secundario es la diferencia entre la resistencia y la inductancia del secundario, ya que en el Tokamak varía dependiendo de las características del plasma. Por ejemplo, cuando la corriente del plasma es baja, el plasma es resistivo, pero cuando hay una corriente alta, la temperatura de los electrones se incrementa y la resistencia cae a niveles muy bajos. La inductancia del plasma depende principalmente de la distribución de la corriente dentro de la cámara de vacío. Al momento de modelar la corriente del plasma en un Tokamak, es imperativo tomar estos efectos en cuenta.

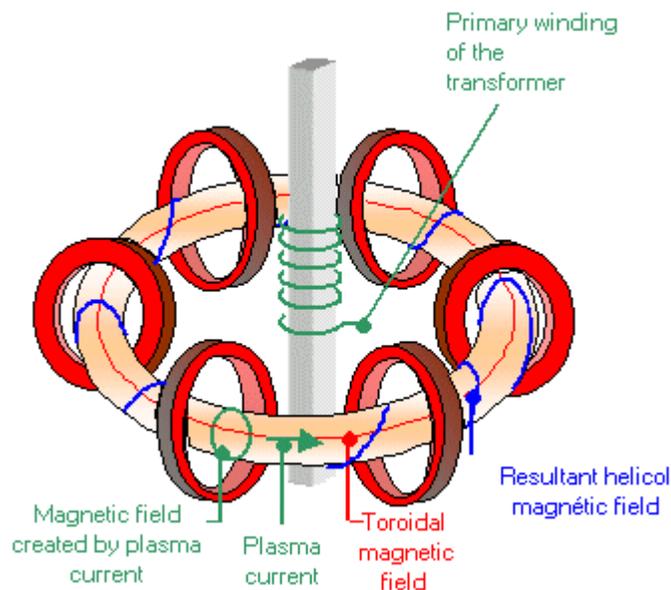


Figura 8 Configuración del solenoide central en un tokamak. Bobinas toroidales y campo magnético toroidal en color rojo. Bobina del primario y corriente del plasma en color verde. Campo magnético resultante en color azul. (Imagen obtenida del Instituto de Recherche sur la Fusion Magnétique).

La corriente del plasma genera un campo magnético por la ley de Biot-Savart, el cual se puede apreciar en la Figura 8 en color verde, conocido como campo magnético poloidal. La combinación de los campos magnéticos poloidal y toroidal dan como resultado un campo magnético helicoidal, el cual es esencial para contrarrestar la presión del plasma. Si el campo poloidal no existiera causaría que las partículas derrapen (drift) a lo largo del campo toroidal. El campo magnético poloidal es un giro de las partículas para evitar que se escapen de la botella magnética.

Adicionalmente se agregan bobinas verticales para generar campos magnéticos poloidales (paralelas a la corriente del plasma) con el fin de controlar la posición y forma del plasma dentro de la cámara de vacío. Estas se conocen como bobinas de equilibrio vertical, las cuales gracias la ley de Ampere se sabe cómo interactúan las fuerzas entre dos conductores paralelos [10], y con la modificación de esas fuerzas se puede controlar la posición del plasma. Por otro lado, la forma del plasma se da según el modelo MHD, el cual para alcanzar el equilibrio necesita del

campo magnético vertical. En la Figura 9 se puede apreciar las líneas de campo magnético generado por las bobinas de equilibrio vertical en el ST MEDUSA-CR el cual solo posee dos bobinas conectadas en serie, aunque en otros dispositivos pueden existir tantas como sean necesarias.

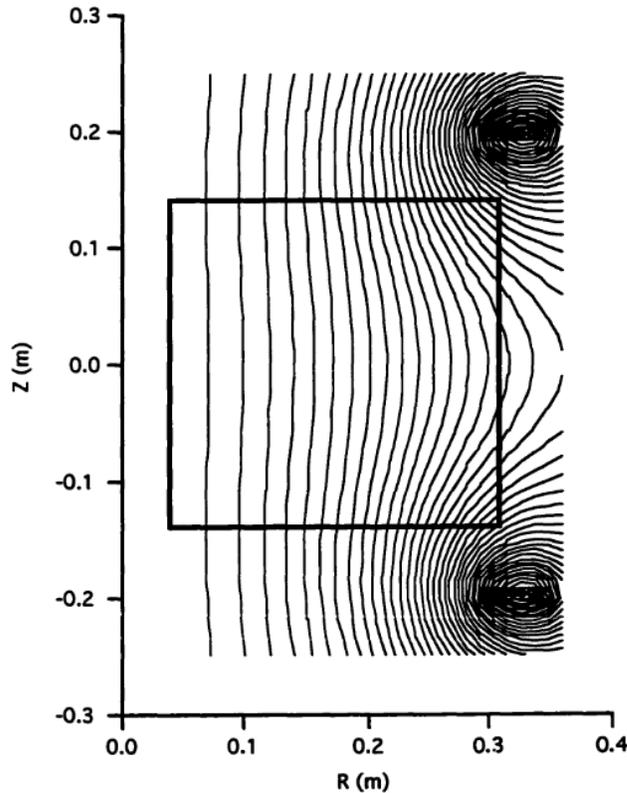
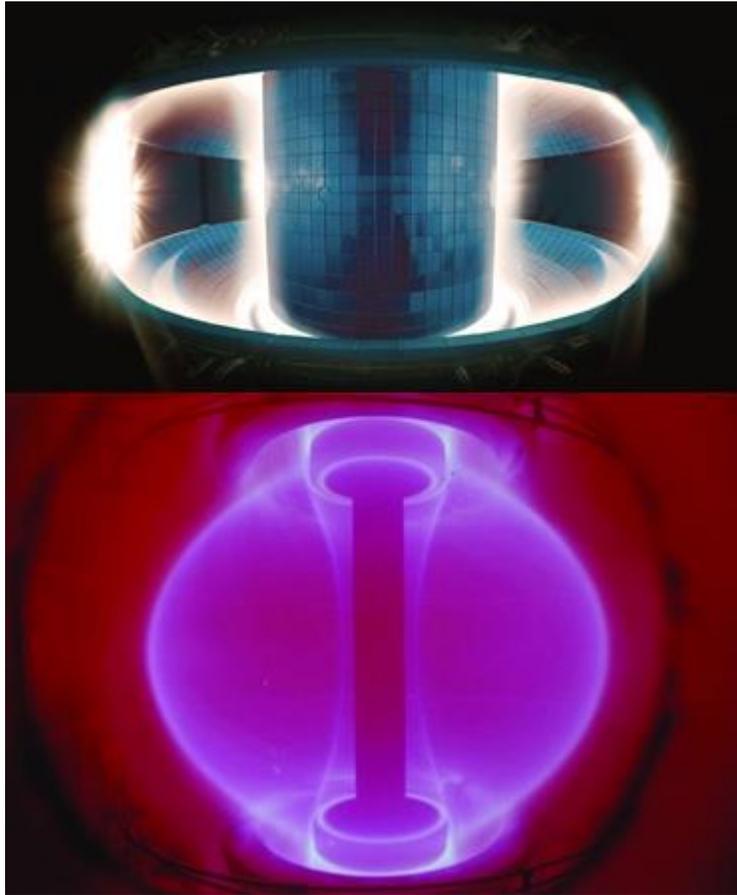


Figura 9 Líneas de campo magnético de bobinas de equilibrio vertical de ST MEDUSA-CR.

### 2.3 Tokamak esférico

Los Tokamak esféricos (“*Spherical Tokamaks*”), son conocidos también como Tokamaks de baja-relación-de-aspecto (“*low-aspect-ratio*”) o pequeña-relación-de-aspecto (“*small-aspect-ratio*”), se han convertido en dispositivos de interés para la comunidad científica, en la cual hay alrededor de 16 Tokamaks esféricos en operación en el mundo [9]. El interés en estos dispositivos se debe a las ventajas sobre los Tokamaks convencionales, entre ellas se puede encontrar: permite realizar descargas de plasmas de alta- $\beta$  (“*High- $\beta$  Plasmas*”), son más resilientes a disrupciones fuertes y tienen un volumen pequeño. En contraste, los Tokamaks esféricos presentan dificultad a la hora de construirlos y operarlos. [10]



*Figura 10 Forma del plasma de un Tokamak Convencional (imagen superior). Imagen de la forma de un plasma de un Tokamak esférico (imagen inferior) (tomada de [13])*

Los Tokamaks esféricos son una forma evolucionada de los Tokamaks convencionales [11]. En el concepto son idénticos, pero con una relación de aspecto muy distinta. Desde el punto de vista de la física, genera cambios muy importantes entre los dos; esto se puede apreciar en la Figura 10 en la cual se ve la diferencia entre la forma de los plasmas.



Figura 11 Tokamak Esférico MEDUSA-CR

El Tokamak esférico pequeño MEDUSA-CR (Figura 11) (Madison EDucational Small-Aspect-ratio Tokamak) fue diseñado y construido para observar el plasma esférico producido óhmicamente en escala de laboratorio. Además, sirvió como antesala para la construcción del Tokamak esférico de ultra-baja-relación-de-aspecto. En la actualidad, se encuentra en el Instituto Tecnológico de Costa Rica, donde se está poniendo en funcionamiento y se están actualizando diferentes subsistemas. Los principales parámetros de diseño y construcción de este dispositivo se pueden observar en la Tabla 1. [10]

Tabla 1 Parámetros de diseño y operación del Tokamak Esférico MEDUSA-CR

Parámetro	Valor
Radio mayor	0,09 m - 0,14m
Radio menor	0,04m – 0,10m
Relación de aspecto	1,5 (1,35 mínimo)
Corriente del plasma	20 kA (40 kA máxima)
Campo magnético toroidal	0,3T (0,5 T máximo)
Longitud del pulso	1 ms (3ms máximo)

## 2.4 Operación del Tokamak esférico

La operación del Tokamak esférico no es muy diferente a la de un Tokamak convencional. Consiste en bombear el aire de la cámara de vacío hasta la presión adecuada, combinado con la correcta configuración del campo magnético y la mezcla correcta de gas. Esto genera una avalancha que llega a formar el plasma. Luego, se genera una rampa de corriente en el plasma para crear el correcto campo magnético al controlar la forma y la posición del plasma. Si se llega a desarrollar una descarga deuterio-tritio, este es el punto de inyectarlo a la cámara de vacío. Con la relación vista anteriormente  $n\tau T$ , la densidad y el tiempo de confinamiento ya están en la mejor forma para generar fusión, por lo que el siguiente paso es elevar la temperatura. Para lograr aumentar la temperatura se deben utilizar otros sistemas auxiliares como inyección de iones neutros, calentamiento por radiofrecuencia. La salida para la fase de potencia es un proceso crítico. Cuando se apaga el sistema de calentamiento auxiliar, el plasma continúa irradiando potencia, y cuando esto sucede, el plasma es propenso a entrar al *mode lock*, el cual interrumpe plasma. Al finalizar la salida de la fase de potencia, se realiza una rampa negativa de la corriente del plasma hasta que se extinga. Este proceso se muestra en la Figura 12.

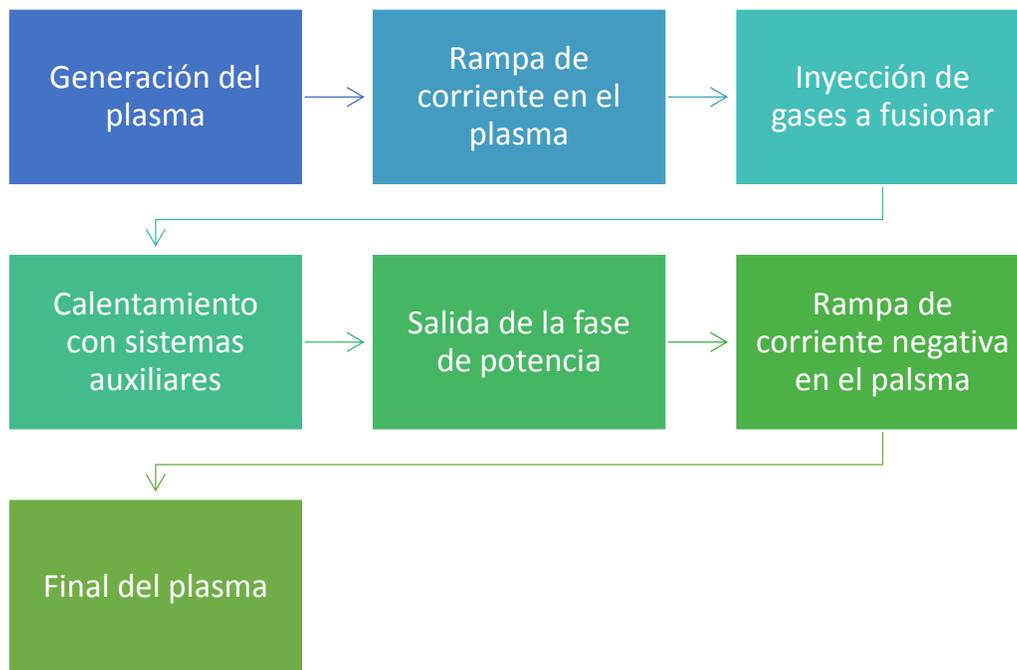


Figura 12 Secuencia de generación de fusión en un Tokamak Esférico

Como se mencionó anteriormente existen diferentes métodos para calentar el plasma. En la Tabla 2 se muestran tres sistemas utilizados para realizar el calentamiento del plasma y dos métodos auxiliares para elevar la temperatura.

Tabla 2 Métodos de calentamiento para Tokamak esféricos [15]

Sistema de calentamiento	Explicación	Limitaciones
Calentamiento Óhmico	Este sistema consiste en crear una corriente en el plasma y cuando la corriente pasa por el medio se calienta por el efecto Joule.	Al momento de calentarse el plasma reduce su resistencia por lo cual el sistema pierde eficiencia. Es por esto que se utiliza únicamente en el arranque
Calentamiento por alta frecuencia	Aprovecha el movimiento circular de los iones y los electrones alrededor de las líneas de campo magnético, las cuales al ser impactadas por ondas electromagnéticas como las microondas, entran en resonancia con el giro de los iones y electrones. A esto se le llama calentamiento ciclotrónico iónico y calentamiento ciclotrónico electrónico.	A cierta temperatura el plasma actúa como espejo para las ondas electromagnéticas por lo que no se puede seguir calentando.
Calentamiento por inyección de iones neutros (NBI)	Este sistema consiste en acelerar átomos a grandes velocidades los cuales se inyectan en estado neutro, y la energía se transmite por choques. Estos átomos neutros son de la misma especie del plasma que se tiene pues los mismos llegarán a ser parte del plasma e incrementan la densidad del mismo.	El sistema para realizar el proceso de acelerar los neutros es sumamente grande y sumamente costoso.

Existen 4 métodos de operación de los Tokamaks esféricos y Tokamaks clásicos. Estos modos son: pulsados, operación híbrida o estado estacionario, corriente alterna (AC) y *Low dwell time pulsed*. En la Tabla 3 se muestra una comparación entre los métodos de operación de los Tokamaks.

Tabla 3 Comparación entre los métodos de operación. [15]

Método de operación	Funcionamiento	Ventajas	Desventajas
Pulsado	Este modo de operación es el natural de cualquier Tokamak. Esto se debe a que para generar cualquier	Entre sus ventajas está generar una descarga a máxima potencia, inducir la máxima corriente en el plasma y	Su principal desventaja es que el tiempo de descarga suele ser muy corto.

	descarga se necesita inducir una corriente, esto se logra al generar una rampa ascendente en el sistema de calentamiento óhmico. Por supuesto no se puede generar una rampa infinita lo cual lleva a tener un tiempo definido máximo de descarga.	optimizar el dispositivo para picos de fusión.	
Híbrido/Estado estacionario	En este modo buena parte de la corriente del plasma es generada por la <i>bootstrap current</i> de las partículas capturadas en las orbitas bananas ( <i>banana orbits</i> ). El restante de la corriente puede ser obtenida por los sistemas NBI, corriente electrónica-ciclotronica y el accionamiento de la corriente híbrida baja (" <i>lower-hybrid current drive</i> ")	Entre sus ventajas encontramos una mayor duración de las descargas. Un potencial de operación en estado estacionario si toda la corriente del plasma es generada por medios no inductivos.	Sus desventajas son: que usualmente las potencias son menores que en la operación pulsada en el máximo de corriente del plasma. Y se convierten en escenarios de descarga más inestables.
Corriente Alterna (AC)	En este modo de operación se busca invertir la corriente al momento de la rampa negativa de corriente en vez de quedar en cero, con lo cual si se hace lo suficientemente rápido se logra no perder la ionización del plasma.	Entre sus ventajas podemos encontrar: se puede lograr realizar descargas a máxima potencia. Además combina la ventajas de una operación pulsada mientras tiene un bajo tiempo de permanencia ( <i>low dwell time</i> ) en la producción de energía.	Entre sus desventajas podemos encontrar: los sistemas NBI deben ser rediseñados pues se pierde la simetría de eje ( <i>Non-axisymmetric</i> ). Se dan esfuerzos en las bobinas durante la proceso de inversión de la corriente. Se dan pérdidas en el confinamiento y deposición de energía durante la inversión de corriente.
Low dwell time pulsed	Este modo de operación es igual al AC, la diferencia radica en que el tiempo que	Las ventajas que presenta este sistema son las mismas que el modo de operación AC	Las desventajas que presenta este sistema son las mismas que el modo de operación AC

	<p>pasa por cero es mayor, con lo cual se pierde la ionización del proceso. En este caso particular podemos hablar de que estamos ante múltiples descargas de pulso.</p>		
--	--	--	--

## 2.5 Modo de corriente alterna

Este modo de operación utiliza el concepto de un transformador tradicional en el cual una bobina central actúa como el primario, para inducir una corriente en el secundario que es el plasma tal cual. Cabe destacar, que el plasma es variable en resistencia e inductancia dependiendo de su temperatura y su densidad, el cual para su análisis debe ser considerado como una resistencia e inductancia en función del tiempo [12].

Este tipo de descargas ya se han conseguido en dispositivos Tokamaks clásicos. La primera vez fue en el STOR-1M [13]. Por otro lado, el Tokamak JET consiguió realizar una descarga de plasma en modo de operación AC con una corriente de 2 MA [14]. De igual forma, el Tokamak ISTTOK, ubicado en Portugal, opera en AC, con corrientes en el plasma entre 4-5 kA [15] [16] [17] [18]. En el Tokamak CT-6B se consiguió un ciclo completo con una corriente en el plasma de 2,5kA, el de mayor corriente en este dispositivo [19]. Anteriormente se consiguió realizar descargas en dos, cuatro y ocho ciclos [20]. El Tokamak HT-7 superconductor consiguió el modo de operación en AC asistido por LHW (*Lower Hybrid wave*) y alcanzó 125 kA de corriente en el plasma [21].

Uno de los problemas presentes en las descargas de un Tokamak es la saturación que se da en el núcleo del primario para inducir la corriente en el plasma, el cual limita el tiempo de la descarga, ya que antes de que llegue a saturación se debe descargar. Para solucionar este problema se realizan las descargas AC, las cuales invierten la corriente del plasma, antes de saturar el núcleo del primario. En la Figura 13 se puede ver la operación de un Tokamak trabajando en régimen pulsado y uno trabajando en AC.

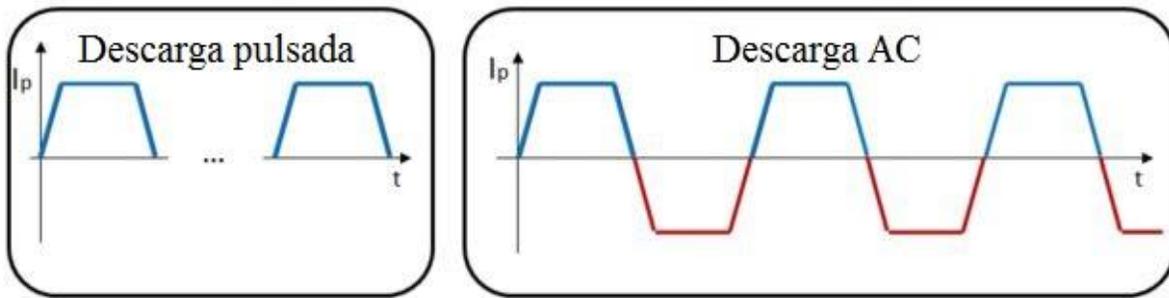


Figura 13 Descarga pulsada comparada a una descarga AC

## 2.7 PID con algoritmo de velocidad

El controlador PID es el más utilizado debido a que históricamente se considera el más adecuado. Funciona mediante un mecanismo de realimentación que calcula el error entre un valor deseado y un valor medido al cual le aplica una corrección para ajustar la planta a lo requerido. [22]

El controlador PID tiene tres parámetros: un proporcional, un integral y un derivativo, de ahí su nombre. Cada una de estas partes cumple una función específica, el proporcional se encarga de actuar en el error actual y determina la reacción de él. El parámetro integral nos da una corrección del error a través del tiempo, es decir acumula los errores anteriores para que en un punto llegue a ser cero. Por último, el término derivativo indica cual es la reacción del tiempo en el que el error se produce. La ecuación que describe a un PID es el mostrado en la ecuación 5.

$$m(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (5)$$

Donde  $e(t)$  es el error entre la señal medida y el valor deseado.

Existe una variante del control PID para los sistemas que requieren mantenerse en un valor deseado. Esto lo consigue al agregar un término extra a la ecuación, el cual tiene como función mantener la condición deseada cuando el error sea cero. [23]

Es importante mencionar que este es un algoritmo principalmente para sistemas digitales. Para obtenerlo se debe derivar la ecuación 5 para obtener la ecuación 6.

$$\frac{dm(t)}{dt} = K_p \left( \frac{de(t)}{dt} + \frac{1}{T_i} e(t) + T_D \frac{d^2e(t)}{dt^2} \right) \quad (6)$$

La ecuación 6 al ser una ecuación diferencial requiere de aplicar ecuaciones de diferencias finitas y al reacomodarla algebraicamente para poder ser aplicada, de esta forma se obtiene la ecuación 7.

$$m(n) = K_P \left( \left( 1 + \frac{T_S}{T_i} + \frac{T_D}{T_S} \right) e(n) - \left( 1 + 2 \frac{T_D}{T_S} \right) e(n-1) + \frac{T_D}{T_S} e(n-2) + m(n-1) \right) \quad (7)$$

Donde:

$T_S$ : Periodo	$T_D$ : constante derivativa	$T_i$ : constante integral	$K_P$ : constante proporcional	$m(n-1)$ : estado anterior.
-----------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------------	-----------------------------

En la ecuación 7 podemos observar que aparece el término  $m(n-1)$  (estado anterior), el cual es el término que nos interesa en el caso del algoritmo de velocidad del PID, puesto que es el que permite dar una consigna que se va a mantener cuando el valor del error sea cero. Cabe aclarar que es decisión del diseñador tratarlo como el estado anterior obtenido o hacerlo constante para que el sistema se comporte como fue planteado el diseño.

Para el cálculo de las constantes  $T_D$ ,  $T_i$  y  $K_P$  se pueden utilizar métodos tradicionales como Ziegler-Nichols o cualquier otro método a gusto del diseñador.

El método Ziegler-Nichols es utilizado para sintonizar el PID y ofrecer la respuesta de la planta ante un escalón unitario en lazo abierto, y si la gráfica obtenida tiene forma de S se puede utilizar este método de sintonización, tal como la observada en la Figura 14. [24]

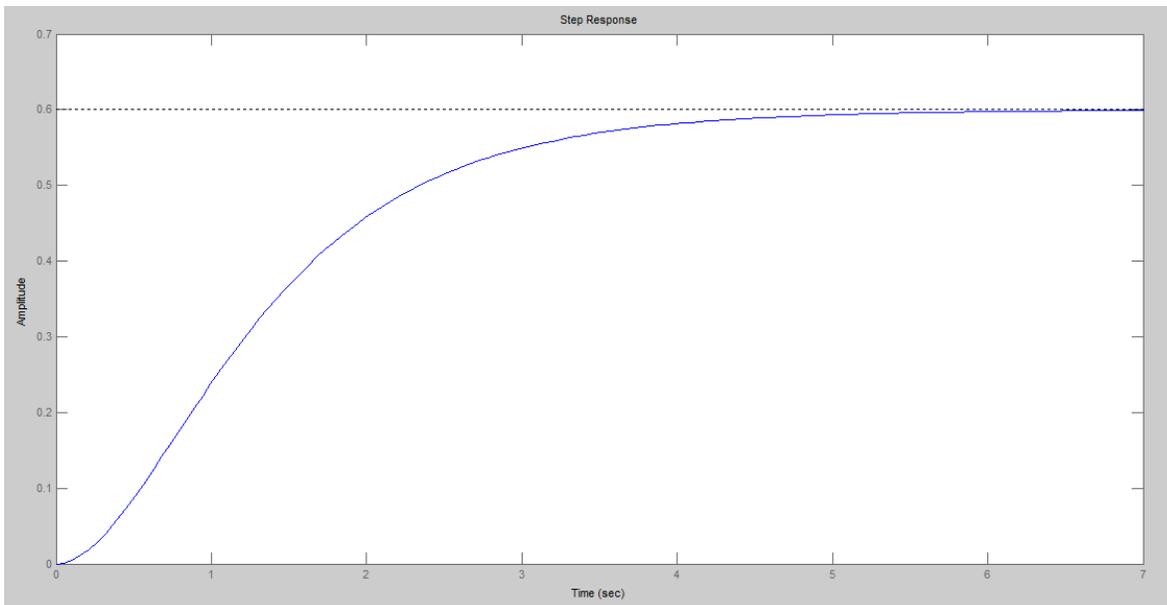


Figura 14. Forma de la respuesta de la planta para poder aplicar el método de ziegler-nichols de lazo abierto.

Si se comprueba que la curva tiene la figura de “S” se procede a calcular las constantes  $K_P$ ,  $T_i$  y  $T_D$  y se utilizan las ecuaciones mostradas en la Tabla 4 **Error! Reference source not found.**

Para el algoritmo de velocidad del PID con estas constantes calculadas es suficiente, pero en el caso del PID tradicional se requiere un cálculo adicional que no se detallará en este documento.

Tabla 4. Forma de la respuesta de la planta para poder aplicar el método de ziegler-nichols de lazo abierto.

Control	$K_P$	$T_i$	$T_D$
<b>P</b>	$1 \frac{T}{L}$	-	-
<b>PI</b>	$0,9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	-
<b>PID</b>	$1,2 \frac{T}{L}$	$2 L$	$0,5 L$

Ahora bien, el cálculo de T y L se utiliza la gráfica de la Figura 15 en la cual para calcular L se debe buscar el punto de inflexión al aplicar la derivada, una vez obtenido la pendiente de la derivada se procede a buscar el par ordeno de ese punto máximo en la gráfica que ya se tiene, este punto será el punto tangente de la recta con la gráfica real, y se aplica la ecuación 8. Para calcular T se utiliza la ecuación 9 cuyos términos se ven en la Figura 15. Para simplificar el cálculo de estos parámetros se recomienda utilizar un programa como Matlab o similar (anexo 2)

$$L = \frac{T_i - Y_i}{m} \quad (8) \quad \text{donde } m: \text{ punto de inflexión}$$

$$T = \frac{Y_{end} - Y_i}{m + T_i - L} \quad (9)$$

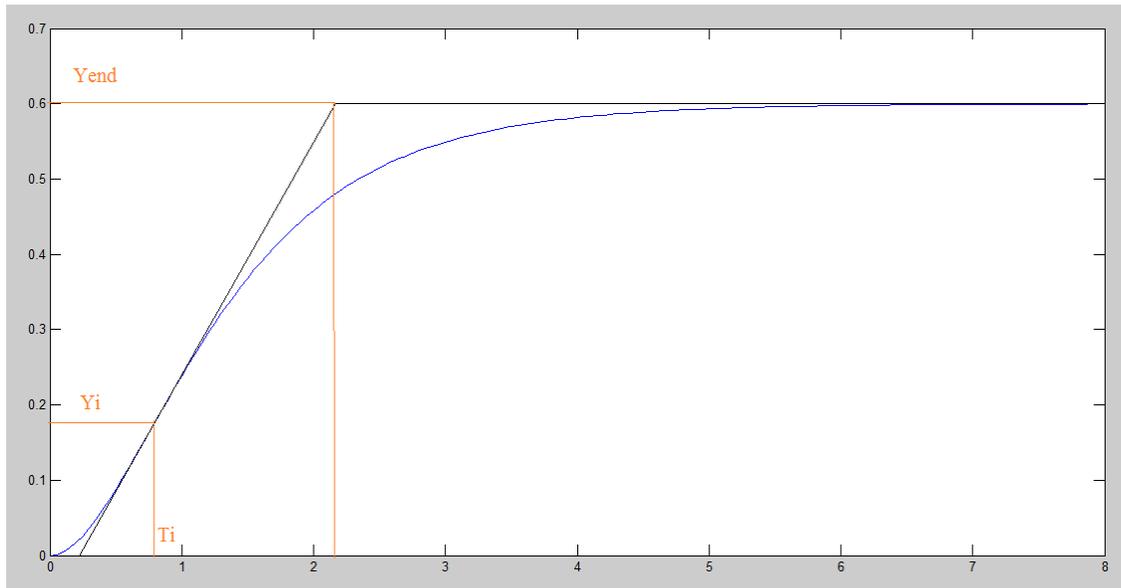


Figura 15 Forma de la respuesta de la planta para poder aplicar el método de Ziegler-Nichols de lazo abierto.

## 2.6 Sliding mode control

El control de modo deslizante (*Sliding Mode Control SMC*) fue desarrollado en la Unión soviética en los años sesenta [25] [26]. Este control es un caso particular de un sistema de variable estructura (*Variable Structure System VSS*), el cual es una técnica de control no lineal con características que lo hacen muy atractivo como: precisión, robustez, facilidad de sintonización e implementación [27].

Los sistemas de modo deslizante se diseñan para que manejen sistemas de estados a través de superficies particulares en el espacio de estados, llamado superficie de deslizamiento. En el momento que la superficie de deslizamiento es alcanzada, el sistema de control de modo deslizante mantiene el estado en la zona colindante de la superficie, es decir hace un movimiento en zig-zag (*chattering*) como el que se muestra en la Figura 16.

El control de modo deslizante se diseña en dos partes, la primera parte es el diseño de la superficie deslizante la cual debe satisfacer las especificaciones de diseño. La segunda es la selección de las reglas de control que realizan la conmutación para que el sistema de estados alcance la superficie deseada. [28] [29]

Existen dos ventajas principales en el control de modo deslizante, la primera es que el comportamiento dinámico del sistema se puede adaptar a la elección particular de la función deslizante. La segunda, es la respuesta del sistema a lazo cerrado se vuelve totalmente insensible

a incertidumbres particulares. Este principio se extiende a la incertidumbre de los parámetros del modelo, las perturbaciones y la no linealidad que están limitados. [30]

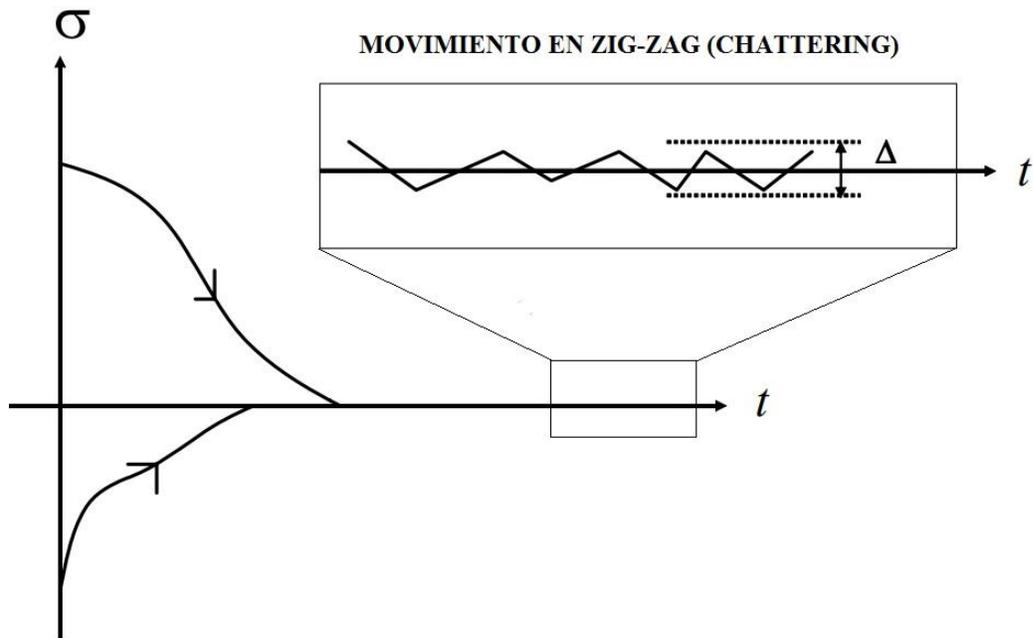


Figura 16. Superficie de deslizamiento y como el sistema intenta mantenerse sobre la superficie.

### Capítulo 3: Diseño propuesto

---

El sistema de control de corriente del Tokamak Esférico MEDUSA-CR se compone de dos etapas: el sistema de almacenamiento de energía y el sistema de descarga. Cada uno de estos sistemas se compone a su vez de dos secciones: el sistema de potencia y el sistema de control. Se decide este diseño debido a que la resistencia de las bobinas sumado a la gran cantidad de corriente impide conectarlo directamente a la red eléctrica del Instituto Tecnológico de Costa Rica pues la acometida del edificio no puede abastecer tal cantidad de energía. Además, conectarlo directamente a la red conlleva un elevado costo en dinero y en horas hombre para generar un buen ambiente. Por consiguiente, se opta por un sistema que pueda adaptarse a esa acometida que es a 208V 50A trifásico. A continuación, se detalla cada subsistema diseñado y cada una de sus subsecciones.

#### **Sistema de potencia**

En esta sección se detalla el diseño del sistema de almacenamiento de energía y el sistema de descarga; más precisamente el subsistema de potencia de cada uno. Cada una de las secciones explicará la razón del diseño y a su vez las consideraciones técnicas tomadas en el camino.

#### **Sistema de almacenamiento de energía**

El sistema de almacenamiento de energía encuentra su limitante en la acometida con la que cuenta el nuevo edificio del laboratorio de Plasmas (en construcción en el momento de esta tesis), donde se va a ubicar el Tokamak Esférico MEDUSA-CR. Pese a que se solicitó una acometida que pudiera soportar el conectar el sistema de control de corriente directamente, no se instalará por motivos económicos y se debe buscar una solución alternativa.

Por esta razón, se decide utilizar un sistema que almacene la energía para luego realizar el trasiego de la misma hasta las bobinas, sin demandarle a la red eléctrica en un periodo muy corto una gran cantidad de energía. Al tener este sistema de almacenamiento se puede cargar todo el sistema de una forma lenta con una baja potencia. La única repercusión que tiene este sistema es el tiempo de carga. El Tokamak Esférico necesita de un tiempo de enfriamiento entre descargas de al menos 5 minutos [10] por lo que si se amplía el tiempo no es problema esperar entre descargas.

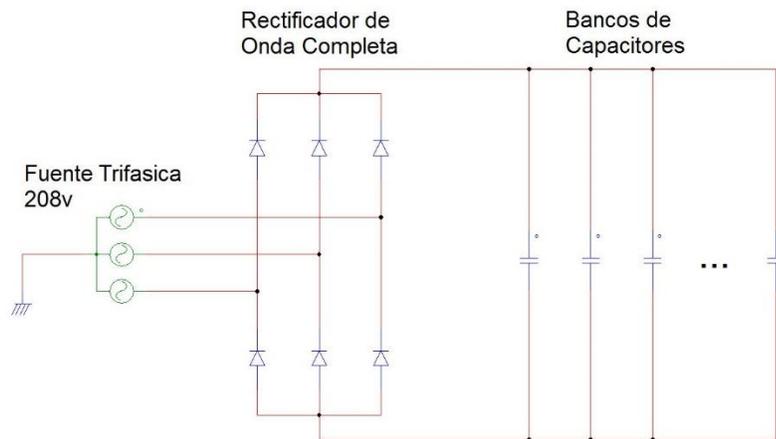


Figura 17. Diagrama eléctrico del sistema de potencia del sistema de almacenamiento de energía

El sistema propuesto se observa en la Figura 17. Este sistema coloca todos los bancos de capacitores en paralelo para la carga, los cuales van a ser de una tensión máxima de 350V. Estos se instalarán en serie para que alcance la tensión necesaria para cada sistema de bobinas del Tokamak Esférico MEDUSA-CR. Es importante destacar que los mismos no se van a cargar a 350V. En cambio, se van a cargar a 280V: la capacidad de salida del rectificador. El rectificador se va a realizar con los diodos STTH50W06SW que soportan una tensión de 600V y 50A. Una vez que alcanzan su tensión máxima se mantendrán en estado de carga hasta que se llegue a realizar un experimento.

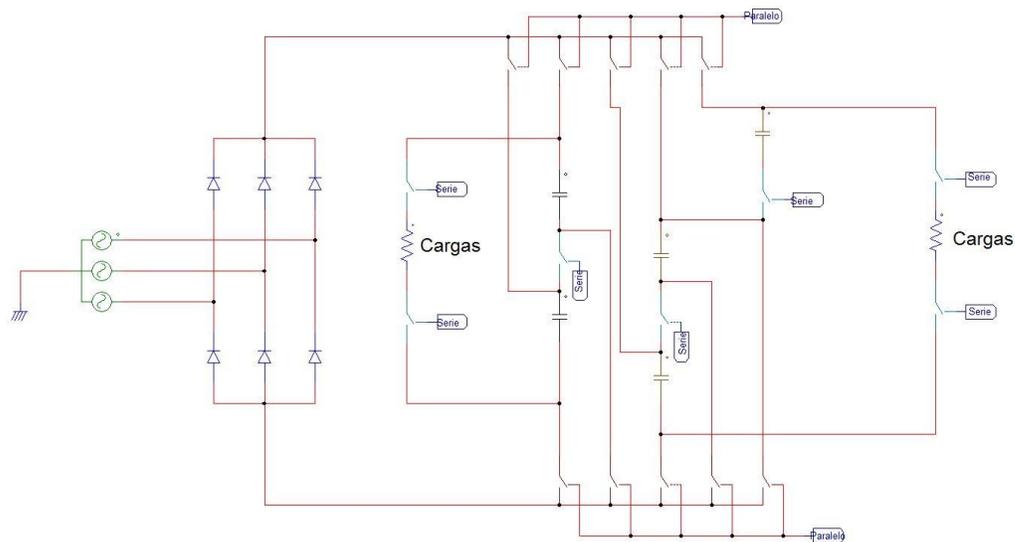


Figura 18. Sistema de control para cambiar los bancos de paralelo a serie.

En la Figura 18 se observa el sistema de control que va a cambiar los bancos de capacitores de serie a paralelo, en el mismo no se observan todos los bancos puesto que muestra el concepto a utilizarse. En color marrón se observan los contactores para poner los bancos en paralelo y cargarlos además de aislarlos de las cargas, mientras que los de color verde conectan los bancos en serie y con las cargas a su vez aislándolos del sistema de carga. A su vez, el sistema se encarga de aislar la red eléctrica al momento de la descarga del Tokamak Esférico MEDUSA-CR. Cabe destacar que este sistema se manejará con contactores pues no se requiere de una conmutación rápida entre un sistema y otro, además que simplifica el problema a la hora de aislar la red eléctrica del momento de la descarga. Los contactores color marrón son los que ponen los capacitores en paralelo y los contactores color verde son los que ponen los bancos de capacitores en serie. Cuando los marrón estén cerrados los verdes estarán abiertos y viceversa.

Los bancos de capacitores se montarán con base en los capacitores ALS70A103NP350 con una tensión de 350 V DC y una capacitancia de 0,01 Faradios. Los cuales se formarán en bancos como los descritos en la Tabla 5. Bancos de capacitores para el sistema de almacenamiento de energía.. En el caso de las bobinas de campo vertical (VF) se utilizará un banco de baterías ya que simplifica el problema. Se usará un banco de baterías industrial de tensión 50V y 300 amperios hora. Este sistema se comprará con su propio cargador de baterías ya que al ser de ácido-plomo requieren un sistema que las mantenga en estado flotante, cuando no se use. Este sistema es de ácido-plomo, pues el costo es mucho más bajo y el proveedor AISA tiene muy buenas relaciones con el laboratorio y ya ha instalado en el pasado otros sistemas similares.

Tabla 5. Bancos de capacitores para el sistema de almacenamiento de energía.

Bobina	Tensión	Capacitancia	Cantidad de capacitores	Cantidad de bancos
Ohmic (OH)	350V	12F	1200	12
Campo toroidal (TF)	350V	9F	900	18

Por tanto, estos capacitores se cargan de acuerdo con lo observado en la Figura 19. En el caso del banco de baterías al tener una capacidad alta de almacenamiento no se requiere cargar entre descargas. Actualmente el Stellarator de Costa Rica 1 funciona con un banco de baterías y, por experiencia, no se hacen más de 8 descargas por el tiempo que tarda en llevarse a cabo el protocolo de seguridad, así como también los tiempos de análisis de datos entre descargas. Por esta razón esta solución es viable y no presenta problemas críticas para limitar las descargas antes de realizar una carga.

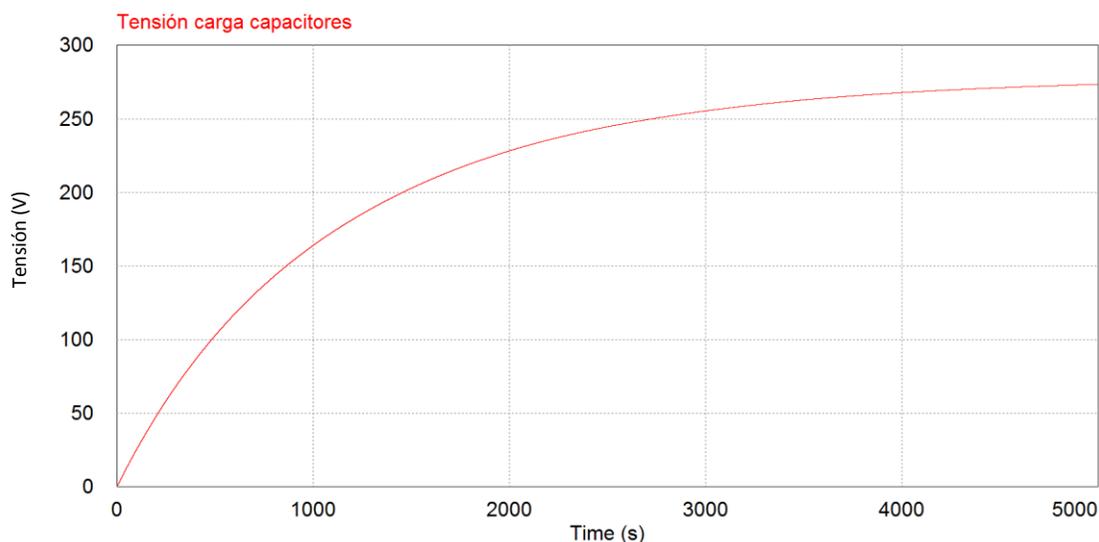


Figura 19 Curva de carga de los bancos de capacitores del Tokamak Esférico MEDUSA-CR

### Sistema de descarga

En el sistema de descarga se presentarán los tres sistemas que se utilizan para cada conjunto de bobinas que se utilizan en el Tokamak Esférico MEDUSA-CR. Este posee el sistema de bobinas Ohmic (OH), las bobinas de campo toroidal (TF) y las bobinas de campo vertical (VF). En la Tabla 6 se observan los parámetros físicos de cada una.

Tabla 6. Parámetros de las bobinas del Tokamak Esférico MEDUSA-CR

Bobina	Siglas	Cantidad de vueltas	Campo magnético corriente máxima	Campo magnético típico	Material	Corriente máxima	Inductancia	Resistencia
Campo Toroidal	TF	93 vueltas en total	0,45 Tesla en el radio mayor. 1,8 tesla en el interior dela bobinba.	0,25 Tesla – 0,30 Tesla	cobre	10 kA	$2,9 \times 10^{-4} \text{H}$	29 miliohms
Ohmic	OH	Solenoides de 188 vueltas	No especificado	5,6	cobre	16 kA	$9,7 \times 10^{-5} \text{H}$	35 miliohms
Campo Vertical	VF	2X 7 vueltas	No especificado	No especificado	cobre	3 kA	$1,8 \times 10^{-4} \text{H}$	15 miliohms

Para estos sistemas se diseñaron dos circuitos: uno para las bobinas de campo toroidal y el sistema ohmic (mostrado en la Figura 20) y otro circuito distinto para el campo vertical

(mostrado en la Figura 21). La razón principal de esta diferencia es que las bobinas de campo toroidal y el sistema ohmic deben tener un comportamiento de corriente alterna. Por eso, se necesita que ambos tengan un puente H que permita generar a partir de una corriente directa una corriente alterna.

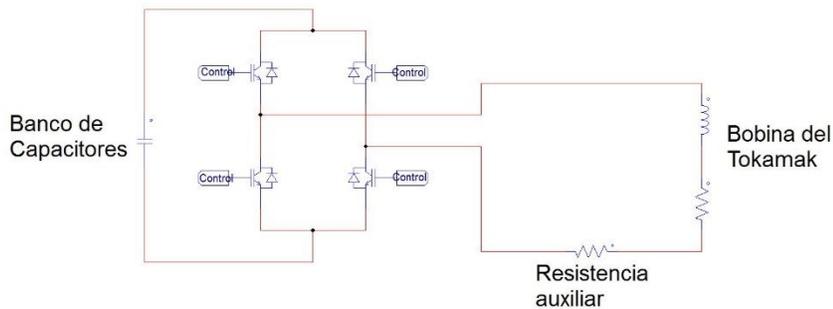


Figura 20. Circuito de potencia para las bobinas de campo toroidal y el sistema ohmic

Como se puede observar tiene una resistencia auxiliar. Esto fue necesario ya que las bobinas del Tokamak se pueden ver como una bobina ideal en serie con una resistencia, es decir un circuito RL. El problema es que volvía el circuito muy lento y era necesario agregar una resistencia mayor para que el transiente sea mucho más rapido. Mediante simulación sin la bobina auxiliar el circuito se comporta como se muestra en la Figura 22. Desde el punto de vista científico, no es una curva aceptable pues el control necesita de una rampa y se obtiene una curva diferente: aunque es una corriente alterna no es la esperada.

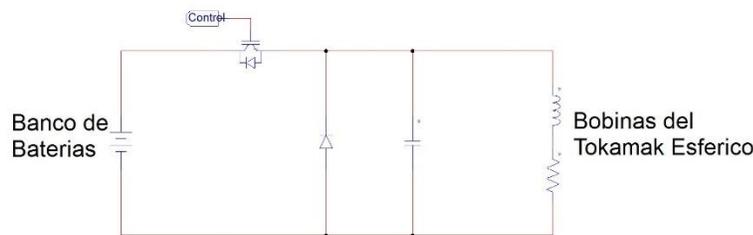


Figura 21. Circuito de potencia para las bobinas de campo vertical.

En consecuencia, para corregir esto se aumenta la resistencia del circuito y se disminuye el  $\tau$  para hacer que su transiente sea de un tiempo menor. Se realizó una simulación para obtener un resultado en el cual la curva se asemeje a la forma de la curva de control. Por lo que la resistencia auxiliar que se obtuvo para el sistema ohmic requiere 0,165 Ohm y para el campo toroidal requiere una resistencia de 0,471 Ohm. Esto da como resultado las gráficas de la Figura 23. Como se puede observar la curva de corriente y tensión se asemejan más a la curva de control: el resultado esperado.

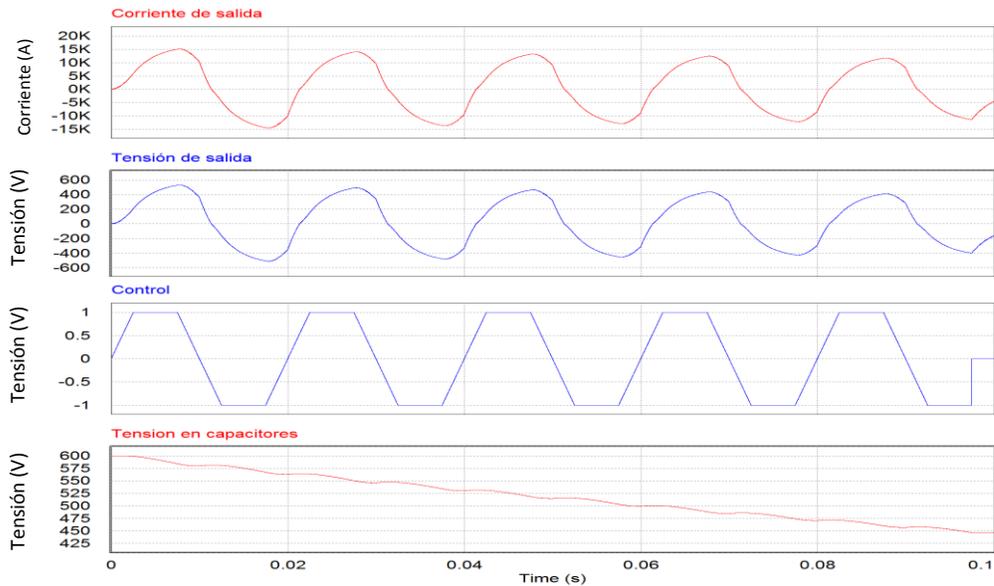


Figura 22. Curva de corriente, tensión, control y descarga del banco de capacitores para el sistema OH sin la resistencia auxiliar.

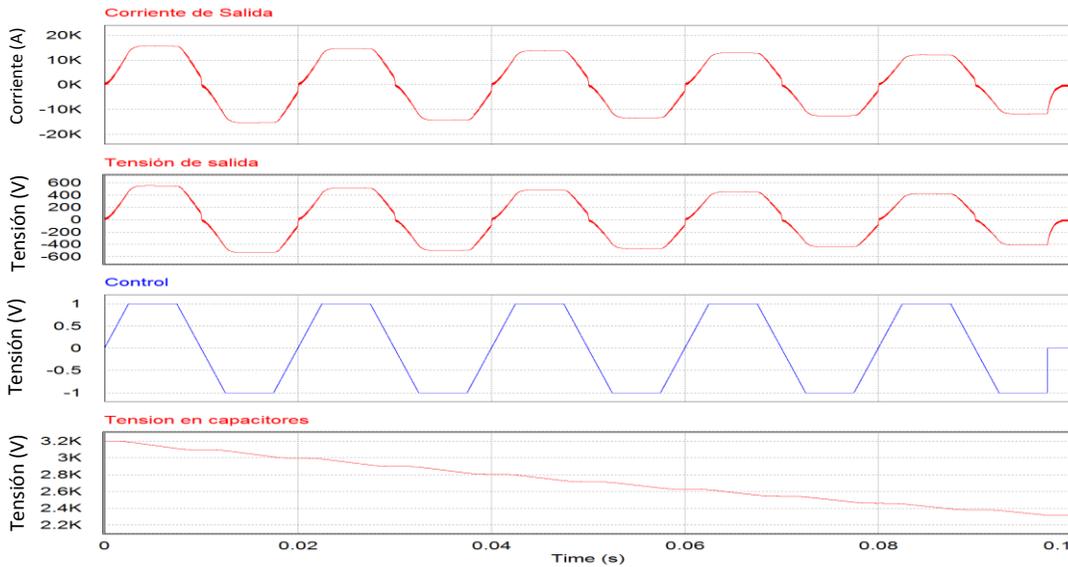


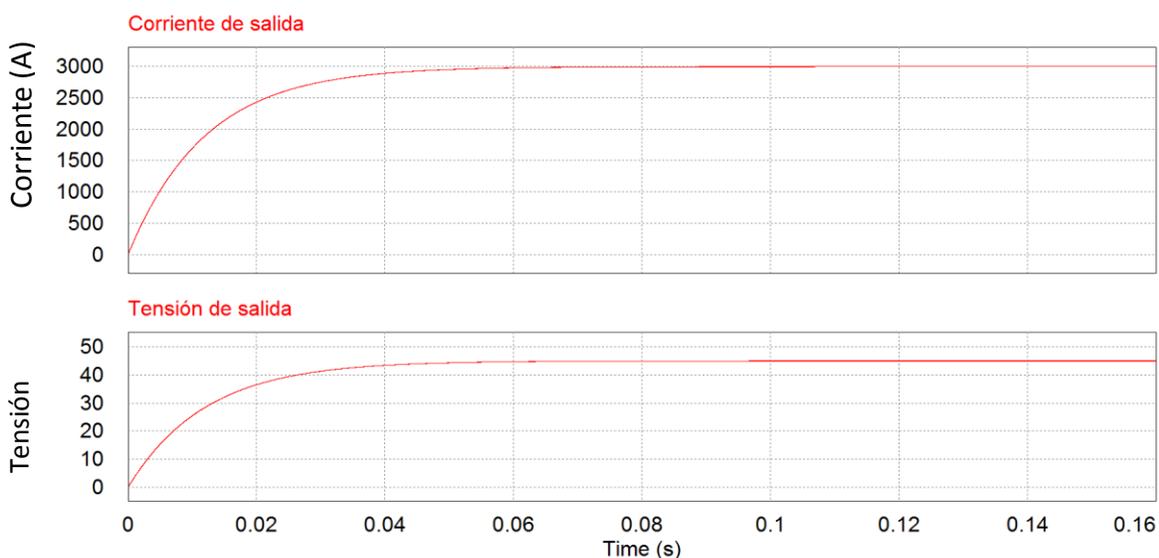
Figura 23. Curva de corriente, tensión, control y descarga del banco de capacitores para el sistema OH con la resistencia auxiliar

Ahora bien, esto conlleva a un precio bastante alto, pues la tensión que se requiere para lograr la corriente necesaria en cada una de las bobinas se debe aumentar. Se pasa a 3,2 kilovoltios el sistema OH y para el sistema TF se requiere 5 kilovoltios. Por lo tanto, se deben comprar bancos de capacitores más grandes, lo cual eleva el costo considerablemente. Para poner en perspectiva

esto, el banco necesario para generar la Figura 22 tiene un costo de 25.000 dólares para todas las bobinas y para obtener las gráficas de la Figura 23 se requiere de 1.435.000 dólares para alimentar todas las bobinas. Si bien parece una suma astronómica, se justifica porque sería la primera vez que se estudiaría descargas en corriente alterna en un tokamak esférico: este sería un experimento sin precedentes y abre una nueva rama de investigación en el área de fusión en dispositivos de tipo tokamak esférico.

Para el circuito de potencia del sistema TF se utilizarán IGBTs modelo FZ750R65KE3, los cuales manejan 6500 Volts y una corriente 1500 Amper en pico. Se pondrán 11 en paralelo en cada una de las ramas. Y para el circuito de potencia del sistema OH se usará el IGBT modelo DD1200S45KL3\_B5 ya que maneja 4,5 kilovoltios y una corriente pico de 2400 Amperios, por lo que se pondrán 7 en paralelo para manejar la corriente necesaria en cada una de las ramas del puente H. Para ambas resistencias se utilizará una barra de acero inoxidable 304L. De forma experimental, se obtuvo que una barra redonda de 1/8 de pulgada de diámetro y una longitud de 1,15 metros hay 0.1 Ohm. Por lo cual, al ser lineal se debe de utilizar para el circuito de potencia del sistema TF como resistencia auxiliar una barra redonda de 1/8 de pulgada con una longitud de 5,41 metros para obtener 0,471 Ohm de resistencia. Para el circuito de potencia del sistema OH se requiere una resistencia de 0,165 Ohm por tanto se requiere una barra redonda de 1/8 de pulgada con una longitud de 1,90 metros.

Para el sistema de campo vertical, se sigue otra estrategia puesto que esas bobinas se utilizan para mover el plasma verticalmente dentro de la cámara de vacío. Se plantea un convertidor Buck pero con la salvedad de que la misma bobina se utiliza como filtro y la resistencia es la carga del sistema. Las curvas de salida se observan en la Figura 24. El cuidado que hay que tener es que se diseñó de manera tal que la descarga solo se dé después del transiente del sistema en aproximadamente 60 milisegundos, dejando 100 milisegundos de descarga.



*Figura 24 Corriente de salida y tensión de salida para el sistema de descarga de las bobinas de campo vertical.*

Para este sistema se usará tres IGBT en paralelo del modelo FZ1200R45HL3 que soporta 4500 Voltios y una corriente de 1200 Ampere en corriente continua. Se utilizará dos diodos en paralelo modelo D721S el cual soporta 4000 Voltios en reversa y 1700 Ampere en corriente continua. Para el capacitor se utilizar uno modelo 615R150GAST50 que tiene capacidad de 500 picofaradios y 15 kilovoltios.

## Capítulo 4: Selección del empotrado y control del sistema

---

Una vez planteado el sistema de potencia para el control de corriente de las bobinas del Tokamak Esférico MEDUSA-CR se debe proceder a diseñar el sistema de control y seleccionar la plataforma donde este sistema se va a ejecutar. En este sistema, la limitante se encuentra en el tiempo que puede durar la transición de positivo al ciclo negativo. Como se vio anteriormente varía mucho este valor en los distintos dispositivos, y la mayoría son tomados experimentalmente.

Para el caso del Tokamak Esférico MEDUSA-CR se tomará como base el tiempo de ISTTOK, el cual debe ser menor a 2 ms. Entre más rápido se pueda realizar el cambio será más beneficioso para el sistema. Así mismo el rizado de la corriente no puede ser mayor al 20%.

### Diseño del control

Para controlar las plantas propuestas en el capítulo anterior se siguen dos estrategias, en el caso de los puentes H se utiliza un control no lineal llamado *Sliding Mode Control* (SMC) y en el caso del convertidor BUCK se utiliza un control PID con algoritmo de velocidad. En cada caso se utilizan estos controles debido a su facilidad de implementación y por su robustez a la hora de correr en un sistema empotrado.

### Control del convertidor de corriente BUCK

Para desarrollar el control del convertidor BUCK se utiliza el control PID con algoritmo de velocidad, el cual permite que se mantenga una premisa, en este caso una corriente constante. Para el cálculo de los coeficientes se utiliza el método de Ziegler-Nicolson. En este método, se realiza una estimulación de un escalón unitario a la planta en el software PSIM y se obtiene la curva de la Figura 25. Con estos datos se procede a calcular los valores  $K_P$ ,  $T_i$  y  $T_D$ . Estos valores se calcularon con MATLAB al usar el código del anexo 2, lo cual arroja el siguiente resultado:

$$K_P = 7.1963 \qquad T_i = 0,0040 \qquad T_D = 9.9950 * 10^{-4} \qquad T_s = 0,001$$

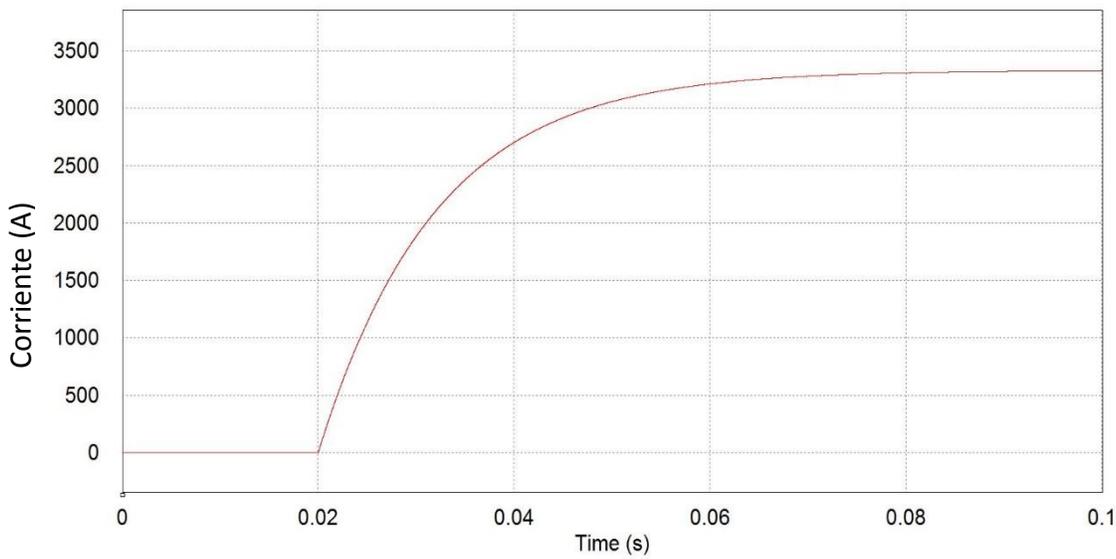


Figura 25. Respuesta al impulso del convertidor BUCK propuesto.

Si se reescribe la ecuación 7 con el objetivo de ordenar los datos obtenemos la ecuación 10.

$$m(n) = K_1 e(n) - K_2 e(n-1) + e(n-2) + R \quad (10)$$

$$K_1 = K_p \left( 1 + \frac{T_s}{T_i} + \frac{T_D}{T_s} \right) \quad (11)$$

$$K_2 = K_p \left( 1 + 2 \frac{T_D}{T_s} \right) \quad (12)$$

$$K_3 = K_p \frac{T_D}{T_s} \quad (13)$$

R: set point (depende de las unidades que se usen)

Por lo tanto, los valores calculados de  $K_1$ ,  $K_2$  y  $K_3$  son los siguientes:

$$K_1 = 16,1890$$

$$K_2 = 21,5817$$

$$K_3 = 0,9995$$

De esta forma se procede a programar la ecuación 10 en el software PSIM con un bloque DLL programado en C. En la Figura 26, se muestra el circuito utilizado para comprobar que el control funcione adecuadamente. Esta simulación da como su salida la curva mostrada en la Figura 27. Esta no posee sobreimpulso y su rizado es inferior al 0,5%. Se puede observar que en este caso la curva dura más tiempo que la descarga, así como también el tiempo para alcanzar el pico máximo es de 0,03 segundos. Con estos dos parámetros logramos ajustar la descarga en el momento en que la curva de corriente está en su estado estacionario. Es decir, la descarga en el Tokamak Esférico MEDUSA-CR se dará después de 0,05 segundos de iniciado este sistema y por un periodo de 0,1 segundos.

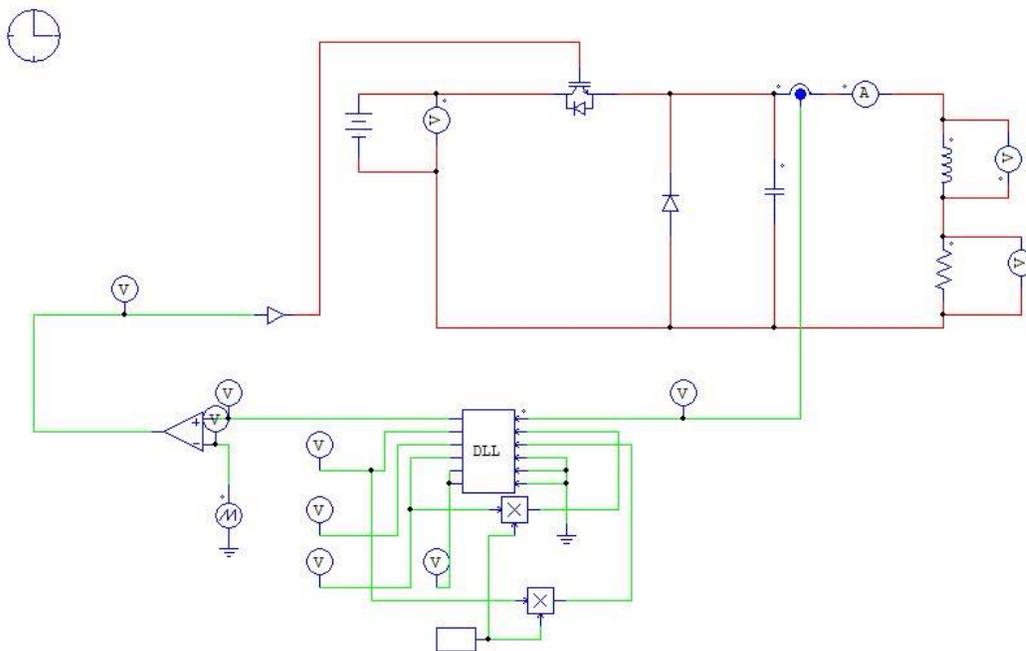


Figura 26. Convertidor BUCK simulado en PSIM, lo cual incluye el control PID con algoritmo de velocidad.

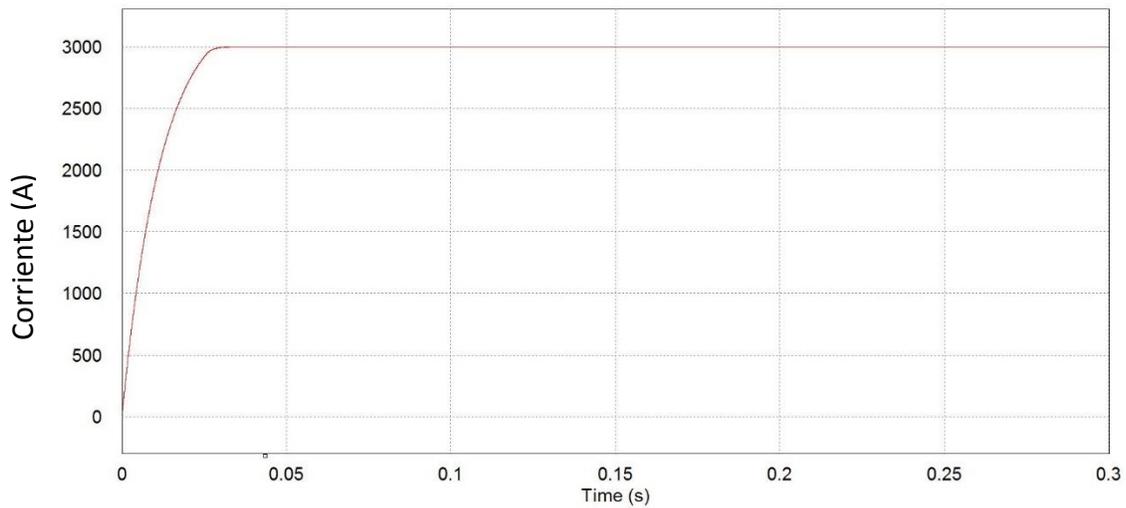


Figura 27. Salida de corriente del convertidor BUCK con el control PID con algoritmo de velocidad implementado.

## Control del puente H

Para el diseño del control de los puentes H se escogió utilizar un control de modo deslizante (SMC) De tal forma, si se encuentra una superficie deslizante que no indefina la planta, puede ser controlada mediante este control. Para esto, lo primero es contar con un diagrama de la planta, como el que se muestra en la Figura 28. A partir de esta planta se pueden deducir las ecuaciones 14 y 15.

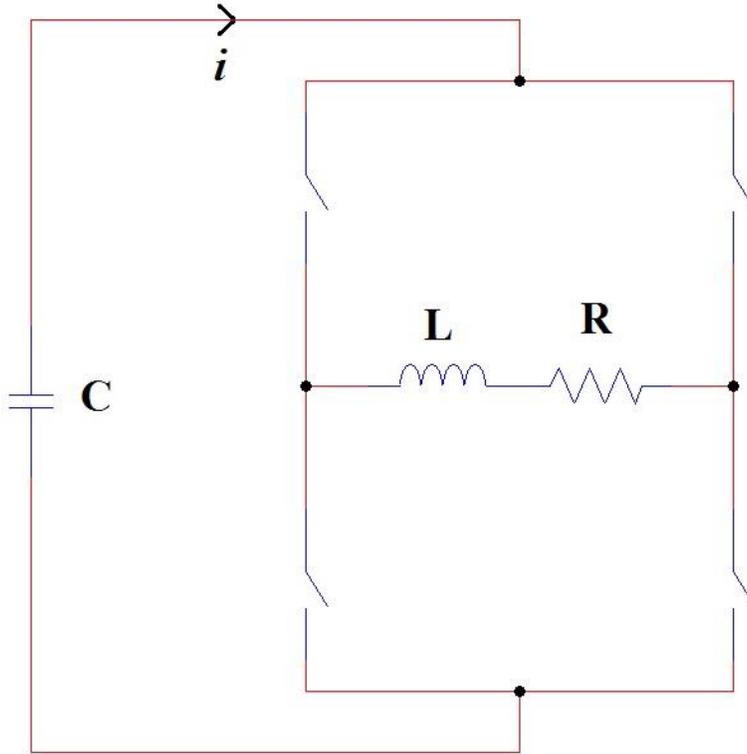


Figura 28. Diagrama eléctrico para obtener el modelo matemático de la planta.

$$L \frac{di}{dt} = uV_c - Ri \quad (14)$$

$$C \frac{dV_c}{dt} = ui \quad (15)$$

Con las ecuaciones diferenciales del sistema, se procede a plantear la curva deslizante. Con este fin, se decide por la más simple de las opciones: la diferencia entre la corriente medida menos una consigna (ecuación 16).

$$\sigma = i - i' \quad (16)$$

Según el criterio de estabilidad de Lyapunov, un punto de equilibrio se considera estable si todas las soluciones que se inicien en las cercanías del punto de equilibrio permanecen en las cercanías del punto de equilibrio; de otro modo el punto de equilibrio es inestable.

Por lo tanto, definimos una ecuación de energía  $V$ , como la mostrada en la ecuación 17, la cual es estable si su derivada es igual a 0.

$$V = f(x_1, x_2, x_3, \dots) \geq 0 \quad (17)$$

En este caso, la ecuación de energía es  $V = \sigma^2$ . Para demostrar su estabilidad se debe buscar que la derivada de del sistema sea menor o igual a cero. Por consiguiente, la derivada de la curva deslizante se observa en la ecuación 18.

$$\dot{\sigma} = \frac{di}{dt} - \frac{di'}{dt} \quad (18)$$

Si se sustituye la ecuación 18 con la ecuación 14 y se iguala a cero obtenemos la ecuación 19. En esta ecuación se aprecia que la conmutación depende de valores constantes positivos, y el único valor que puede indefinir la ecuación es  $V_c$ . Si se observa la Figura 23 la curva de tensión del capacitor cae, pero en ningún punto de la descarga llega a ser cero. Por esta razón, se puede asegurar que el control se puede deslizar sobre la curva propuesta.

$$\frac{L}{V_c} \frac{di'}{dt} + \frac{Ri}{V_c} = u_{eq} \quad (19)$$

Cabe destacar que la ecuación 19 significa que si el valor obtenido de  $u_{eq}$  es ese exacto se va a deslizar sobre la curva propuesta, aunque en la realidad se sabe que es imposible y no se puede eliminar el *chattering*.

Para determinar las reglas de la conmutación se debe satisfacer es que el valor este entre -1 y 1 de forma queda así:

$$-1 < \frac{L}{V_c} \frac{di'}{dt} + \frac{Ri}{V_c} < 1 \quad (20)$$

Como se busca que para la estabilidad estemos en un punto mínimo se debe cumplir la condición  $\sigma \dot{\sigma} < 0$  de la cual se obtienen las reglas de conmutación. Para que se cumpla la condición debemos tener lo siguiente:

$$\frac{\sigma > 0}{\sigma < 0} \quad \frac{\dot{\sigma} < 0}{\dot{\sigma} > 0}$$

Gracias a las condiciones anteriores obtenemos las siguientes reglas de conmutación:

$$\begin{array}{l} \sigma > 0 \\ U=1 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \sigma < 0 \\ U=-1 \end{array}$$

Para comprobar esto, se procedió a programar estas condiciones en c y se generó una biblioteca DLL, con el objetivo de poder correrlo en el software PSIM. De igual forma, se agregó un muestreador y un ADC para que el sistema se comporte de la forma más similar posible a la realidad. El circuito se muestra en la Figura 29. La frecuencia de operación de este se determinó por ensayo y error junto con la simulación. Se probaron distintas frecuencias, con el objetivo de determinar cuál era la que tenía menos rizado. Se determinó que entre mayor la frecuencia menor es el rizado. Por consiguiente, se seleccionó 40 kHz que obtuvo un rizado menor al 10%. Además, para este control particular el tiempo de muestreo de la señal de realimentación también será de 40kHz. Con estos parámetros ya definidos se obtiene como resultado la Figura 30. Que es muy similar a la obtenida en la Figura 23 en la gráfica de corriente. Cabe resaltar que en el tiempo en alto máximo o mínimo cae en línea recta para aprovechar más tiempo de corriente y, a su vez, buscar hacer el paso por corriente cero lo más rápido posible, en este caso el cruce por cero es de 36 microsegundos.

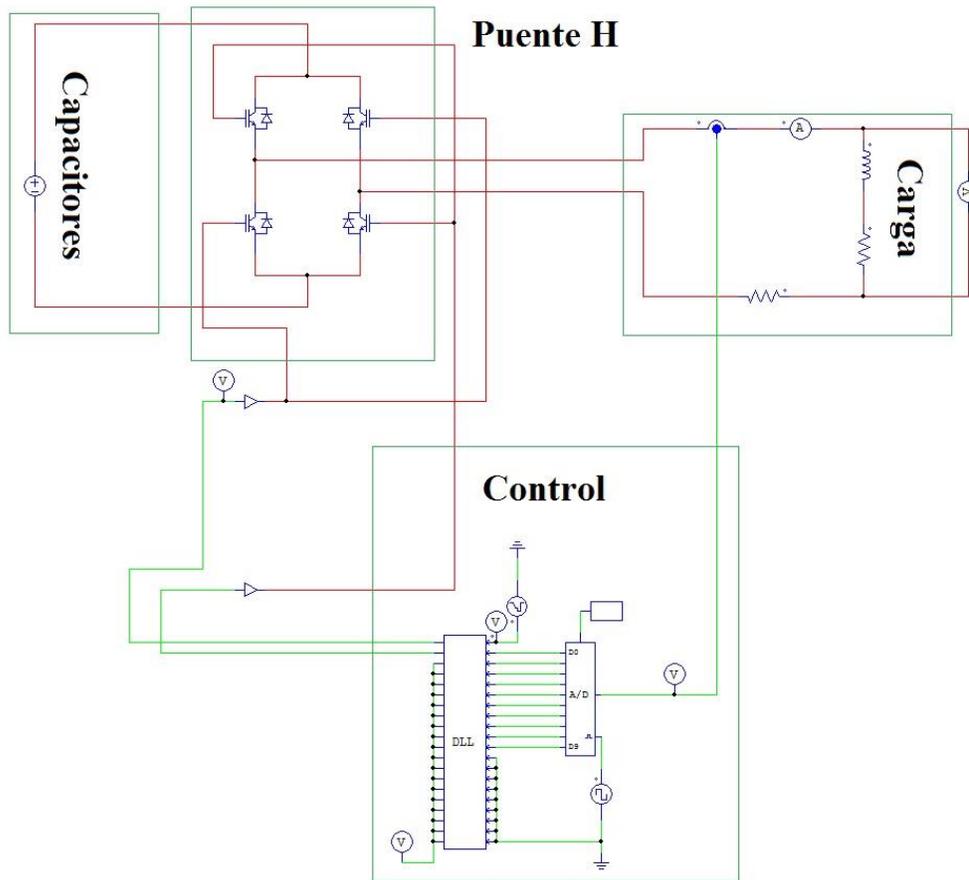


Figura 29. Puente H con el control implementado en C.

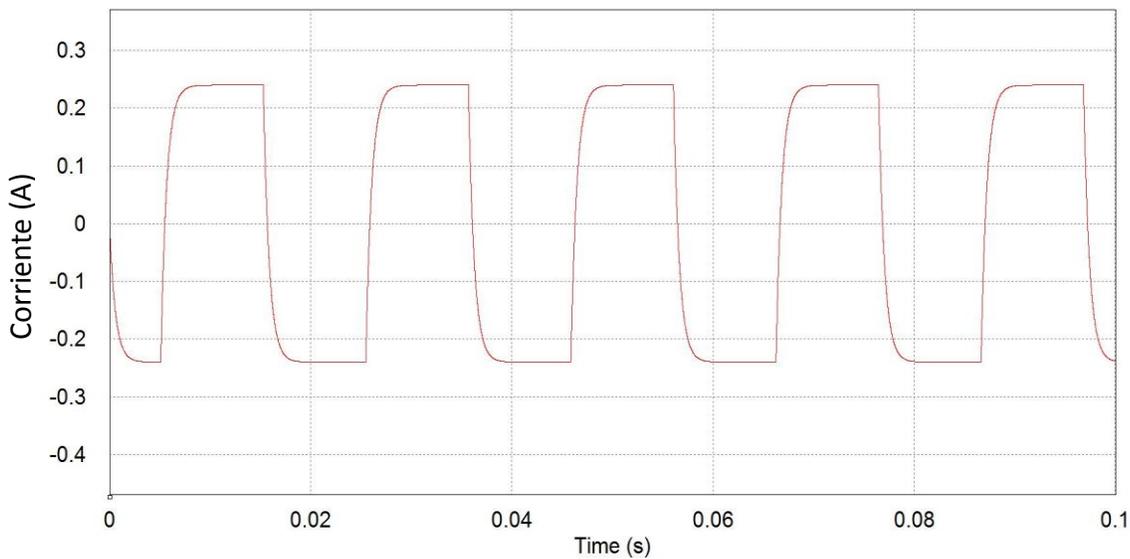


Figura 30. Curva resultante de la simulación con el control propuesto.

## Selección del sistema empotrado

El sistema empotrado a elegir debe de cumplir con mínimo las siguientes características:

- Poder ejecutar una tarea cada determinado tiempo, para el caso del PID con algoritmo de velocidad debe hacerlo al menos con una frecuencia de 1kHz, y en el caso del control de modo deslizante debe ejecutarse con una frecuencia de 40kHz.
- Debe poder ejecutar el muestreo y los cálculos en cada caso en un tiempo menor a  $1 \times 10^{-5}$  segundos en el caso del control deslizante, y de 0,001 segundos, en el caso del PID.
- Debe poseer entradas analógicas para la lectura del sensor de corriente, en ambos casos.
- Debe poseer salidas digitales para el sistema de control en modo deslizante que permita conmutar como mínimo a 40kHz.
- Debe poseer salidas en PWM para el sistema de control con PID.
- Debe ser capaz de recibir una señal digital que le indique un sistema maestro cuando activarse, para ambos casos.

Con las características planteadas se escoge utilizar el DSPIC30F4011, ya que dentro de sus características posee lo siguiente:

- Posee un compilador de C optimizado, lo cual facilita la programación.
- Trabaja a 30 MIPS.
- Posee 5 timers de 16 bit, y se pueden combinar para obtener dos de 32bit en caso de ser necesario.

- Posee pines PWM de salida.
- Tiene salidas digitales de alta corriente a 25mA.
- Posee un ADC integrado con cuatro muestreadores que trabaja a 1Msps, con nueve canales de entradas.
- Posee una arquitectura Harvard modificada.

Con estas características se puede asegurar que los controles van a trabajar sin problema alguno. Sumado a esto y en segunda instancia, el Laboratorio de Plasmas para Energía de Fusión y sus aplicaciones ya ha trabajado con este integrado, pues tiene una placa de desarrollo para el mismo.

Esta selección se puede hacer en un sistema empotrado de baja capacidad si lo comparamos contra un microprocesador, puesto que los cálculos a realizar son simples y pequeños, y denota que el diseño del control incide directamente en los recursos que va a necesitar.

Para comprobar si el empotrado seleccionado cumple con los requerimientos, se desarrolla una prueba de concepto en la cual se baja la potencia para ver el efecto del control sobre una planta equivalente.

### **Implementación de una prueba de concepto**

Para el sistema de control con modo deslizante se realiza la prueba de concepto con el objetivo de probar el control y que el empotrado seleccionado cumple con los requerimientos planteados. En el caso del control PID, no se realiza la prueba pues de acuerdo con [31] en el laboratorio de plasmas ya se realizaron las pruebas de concepto, las cuales demuestran que para las condiciones de trabajo el microcontrolador funciona y cumple los requerimientos.

Dado que es un sistema que trabaja con alta potencia, se propone realizar una prueba en baja potencia, pero que la constante  $\tau$  sea igual y que la resistencia y que la corriente se comporten de manera similar a la planta real, con una disminución de la energía que utiliza.

El circuito eléctrico utilizado para la prueba de concepto se muestra en la Figura 31. La cual utiliza una carga modificada de 0,029 Henrios, una resistencia total de 50 Ohms, y una tensión de 50 Volts, los cuales tiene un factor de 1000 en escalamiento respecto de la planta real. Con esto la corriente esperada es de 1 Amperio.

Pese a que la planta se diseñó para que trabaje a 50 Volts por limitaciones de fuentes de más potencia y componentes disponibles a la hora de hacer la prueba se decide bajar la tensión de la fuente a 12 Volts con lo cual lo único que sufrirá es una disminución en magnitud, pero la forma de la onda será igual. El componente que limita toda la potencia es la resistencia en serie con la bobina que se utilizó para obtener los 50 Ohms, la cual es de 2,5 Watts. Además, esta resistencia va a permitir conectar el osciloscopio para medir la tensión y, por ley de Ohm, obtener la corriente que pasa por la resistencia. En este caso no se tomará en cuenta el cambio de la resistencia por la temperatura y se asume que es ideal.

Para el sistema de puente H se usa el integrado L298 el cual tiene una tensión de trabajo con 50 Volts y una corriente de 2 Amperios y puede conmutar a un máximo de 90kHz. La entrada de tensión de control es de 5V compatible con la salida de tensión del DSPIC30F4011.

Para medir la corriente se utiliza el Sensor integrado en el L298 en la patilla 15, el cual se le suelda una resistencia de 1 Ohm que hace una salida lineal y proporcional de la corriente que consume el sistema. Debido a que en la prueba se trabajó con una corriente máxima de 230 mA se diseñó un circuito para acondicionar la salida (Figura 32) de 0 a 5V en el rango de 0 a 1 Amperios de salida del sensor y así aprovechar todo el rango del ADC. Este sensor indistintamente del signo de la corriente da valores positivos, por lo cual por control se sabe cuándo debe pasar por cero y se hace el cambio con el puente H.

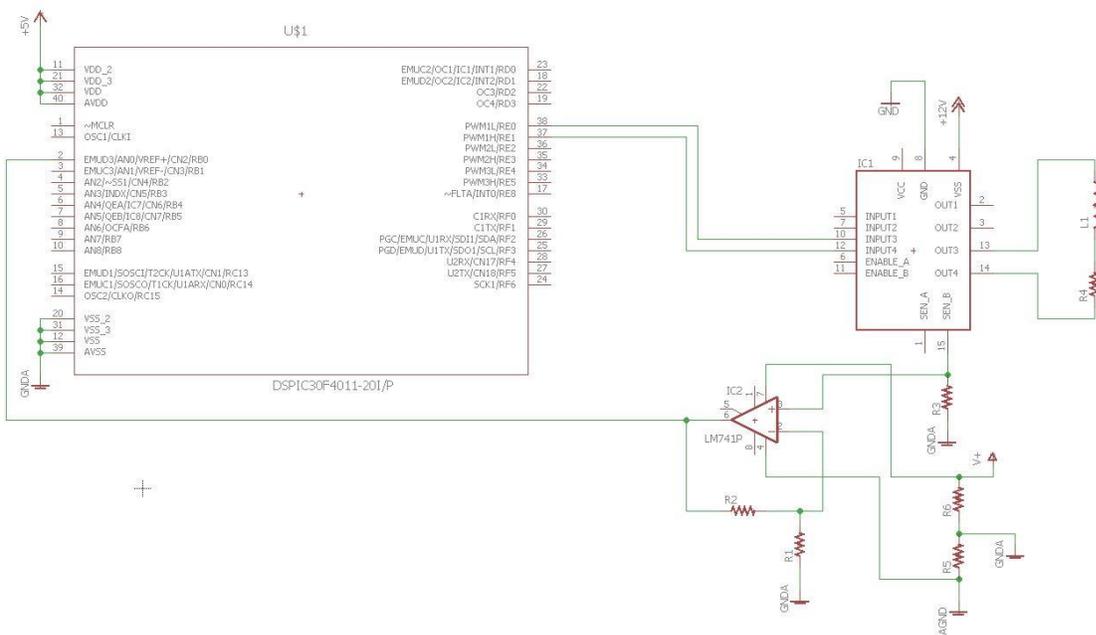


Figura 31. Diagrama eléctrico del circuito planteado para la prueba de concepto.

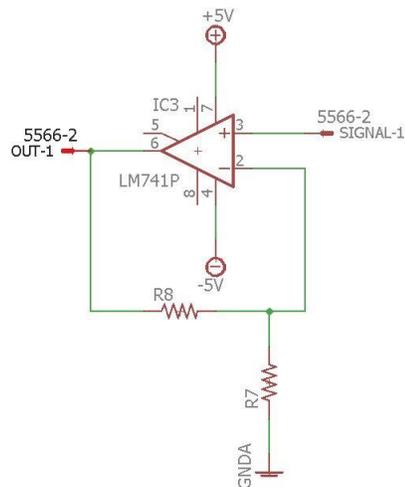


Figura 32. Diagrama del circuito acondicionador de señal de salida del sensor de corriente

## Resultados de la prueba a pequeña escala

En la Figura 34, se muestra la gráfica obtenida de la prueba de concepto (la implementación de la prueba de concepto se observa en la Figura 33). La corriente se midió en la carga directamente de la siguiente forma: se tomó la tensión y de esta se calcula la corriente pues se conoce la resistencia. Cabe destacar que se asumió que la resistencia no varía por la temperatura, lo cual no representa un error significativo.

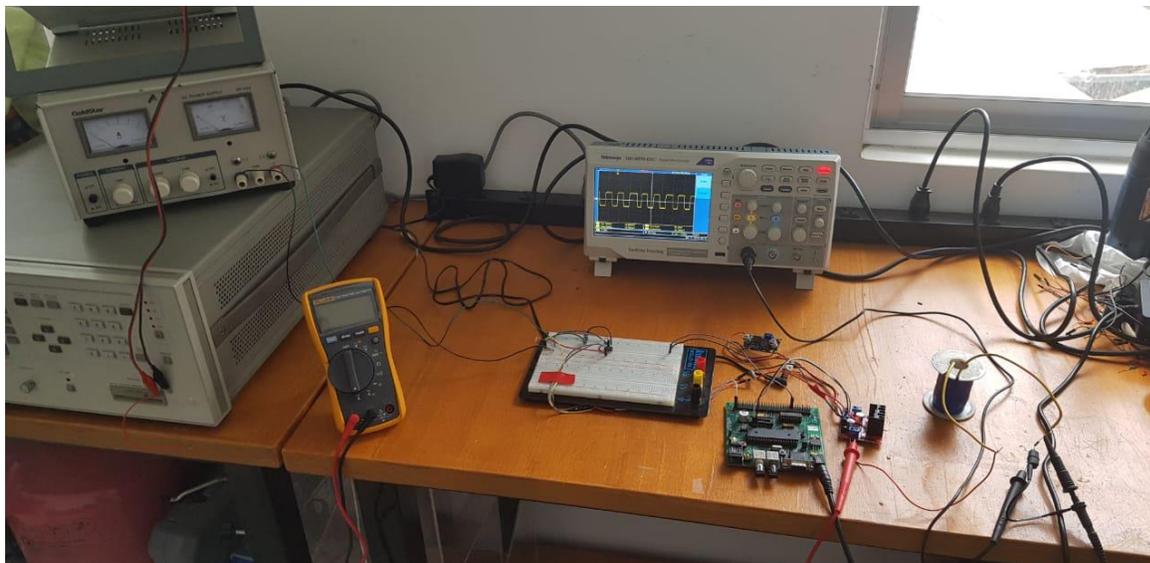


Figura 33. Prueba de concepto implementada y en funcionamiento

En la misma gráfica en línea punteada se observa el resultado de la simulación, la cual fue ejecutada a 12 Volts de tensión de entrada y con la misma carga medida. En esta, se observa que el control se está ejecutando adecuadamente puesto que la diferencia entre una curva y otra es de cercano al uno por ciento. El rizado máximo es del 8%, y es inferior al 10% planteado para este proyecto.

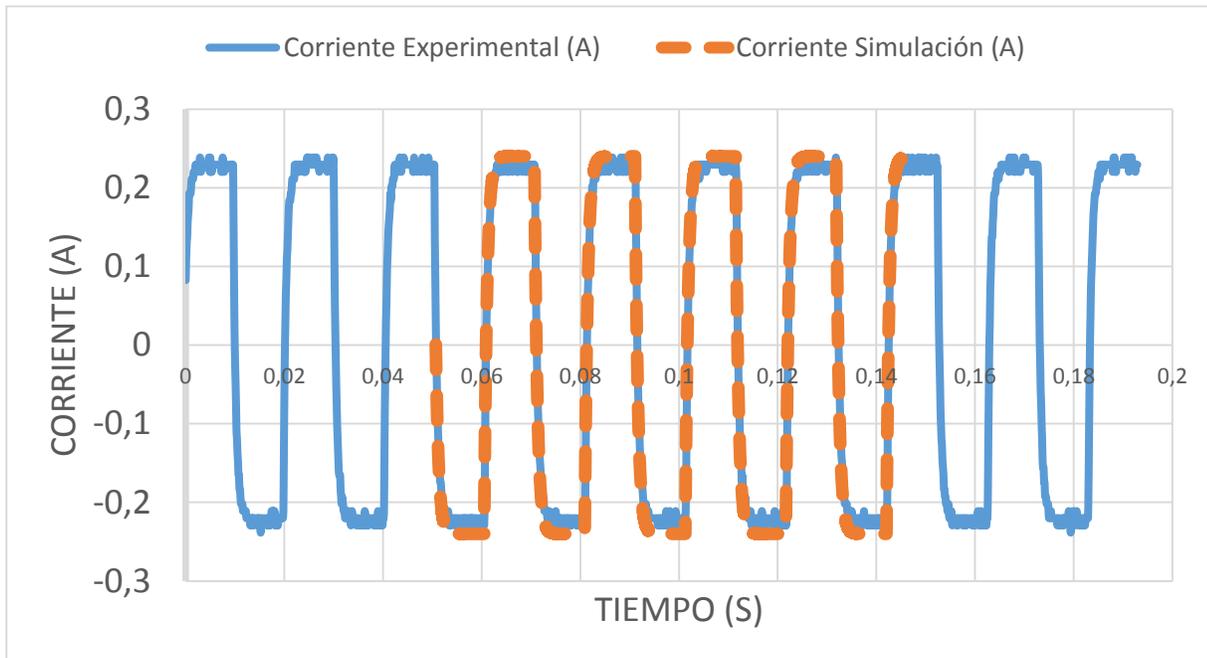


Figura 34. Curva de corriente experimental de la prueba de concepto (Línea Continua) comparada con la curva de la simulación (línea punteada)

Para el sistema de control se implementó una interrupción por temporizador en el DSPIC30F4011, el cual ejecuta la interrupción de  $25\mu\text{s}$ . Por esto, los tiempos de ejecución deben ser inferiores. Por consiguiente, la obtención del dato medido de corriente del sensor y digitalizado del ADC tarda  $4\mu\text{s}$ . Calcular el error entre la señal medida y la consigna tarda  $10\mu\text{s}$ , este tiempo es largo pues se debe consultar la memoria en un *lookup table* el dato a comparar. Seguido a esto se debe ejecutar las reglas planteadas para saber cómo conmutar: son 3 sentencias “if” concatenadas lo cual dura  $7,5\mu\text{s}$ . Existe una instrucción encargada de limpiar la bandera de la interrupción que tarda  $0,5\mu\text{s}$ . Y finalmente, un contador y su restablecimiento a cero para saber si está en la parte positiva o negativa. El sensor tarda  $0,5\mu\text{s}$ . Eso da un total de  $22,5\mu\text{s}$  en el peor escenario. Además de hacer las mediciones individuales se hizo una medida de toda la ejecución de la interrupción, la cual tardó como máximo  $22,5\mu\text{s}$  y un mínimo de  $20\mu\text{s}$ . Esta diferencia se atribuye a las variaciones en el tamaño de la resta realizada para calcular el error, pues individualmente variaba en  $2\mu\text{s}$  aproximadamente, dependiendo del dato medido.

## Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones.

---

### Conclusiones

Se propusieron tres reguladores de corriente para cada uno de los juegos de bobinas del Tokamak Esférico MEDUSA-CR. Se propuso un puente H para controlar la corriente a través de las bobinas de campo toroidal (TF) y para las bobinas del campo Ohmic (OH). Los cuales permiten el Tokamak Esférico MEDUSA-CR opere en modo AC. Para el Campo vertical se diseñó un convertidor DC-DC tipo Buck. El cual permite mantener una corriente constante a través del tiempo. Para cada uno de estos sistemas se utilizó la bobina como parte de su filtro con el objetivo de simplificar su manufactura.

Para cada una de las plantas propuestas se diseñaron los algoritmos de control. En el caso del puente H se usa un control en modo deslizante y se implementó una prueba de concepto que prueba su correcto funcionamiento. Con esta prueba de concepto se logró evaluar que la simulación solo presenta un error del 1%, por lo que el sistema a carga completa va a tener un comportamiento muy similar a la realidad comprobando que el diseño efectivamente funciona de acuerdo con lo especificado.

En el caso del convertidor Buck se utiliza un PID con algoritmo de velocidad, el cual se ha probado en sistemas anteriores y se sabe que su funcionamiento es similar al de la simulación, por esta razón se puede aceptar la simulación como una prueba fehaciente de que el mismo se va a comportar de acuerdo con la simulación cuando se implemente.

El sistema empotrado seleccionado cubre efectivamente las necesidades requeridas en términos de frecuencia de operación, capacidad de procesamiento de instrucciones, adquisición de datos y capacidad de memoria.

De esta forma se demuestra que es factible desarrollar un Tokamak Esférico que opere en modo AC, siendo esta la primera vez en proponerse en el mundo, abriendo el abanico de posibilidades de investigación en este tipo de dispositivos. Así mismo, se desarrollaron los sistemas de control necesarios para controlar la corriente que pasa a través de la bobina del Tokamak Esférico MEDUSA-CR.

### Preguntas por contestar.

A raíz de este desarrollo quedan varias preguntas que responder para que pueda operar el Tokamak Esférico MEDUSA-CR las cuales se enumeran a continuación: ¿Cuál es la corriente real que se necesita en cada bobina? Para dar respuesta a esta pregunta se debe realizar las simulaciones correspondientes para determinar la estabilidad del plasma con el campo magnético. ¿Qué ventajas tiene un Tokamak Esférico en modo AC versus un Tokamak clásico en modo AC? Es importante dar esta respuesta, puesto que se cree que funciona de la misma forma, pero no se ha demostrado experimentalmente.

¿Qué sistema de control del plasma se adapta mejor a las nuevas condiciones de corriente? Para alcanzar la estabilidad no solo se requiere del sistema que mantenga la corriente constante, por el contrario, se requiere que todos los campos combinados den un resultado esperado, resultado derivado de la simulación de estabilidad, por esto se requiere diseñar un sistema que controle el campo magnético resultante. ¿Cuánto es lo máximo que puede durar la corriente de las bobinas en cero antes de perder el confinamiento? Esta pregunta es fundamental que se responda debido a que en cada dispositivo es distinto el tiempo que puede durar en cero la corriente antes de perder el confinamiento. ¿Cuál es la nueva dinámica del plasma? Al cambiar el modo de operación, es fundamental determinar cómo se comporta el plasma para desarrollar las campañas de experimentación.

### **Recomendaciones**

Para futuros proyectos se plantean las siguientes recomendaciones: es importante ubicar los sistemas electrónicos lejos del Tokamak para que no se vean influenciados por los campos magnéticos oscilantes. Es imperativo poner un sistema aparte de seguridad que pueda abrir el circuito en caso de fallo de algún componente. Se recomienda hacer pruebas escalonadas hasta llegar a la máxima potencia, esto con el fin de detectar posibles fallos antes de introducir toda la potencia. Es preciso realizar un plan de mantenimiento para los bancos de capacitores con el fin de detectar posibles fallas.

## Bibliografía

---

- [1] O.N.Jarvis, «Kaye&Laby,» 7 6 2017. [En línea]. Available: [http://www.kayelaby.npl.co.uk/atomic\\_and\\_nuclear\\_physics/4\\_7/4\\_7\\_4.html](http://www.kayelaby.npl.co.uk/atomic_and_nuclear_physics/4_7/4_7_4.html).
- [2] S. Atzeni y J. Meyer-ter-Vehn, «The Physics of Inertial Fusion,» Oxford Science Publication, 2004, pp. 2-14.
- [3] Kaye&Laby, «Kaye&Laby,» October 2017. [En línea]. Available: [http://www.kayelaby.npl.co.uk/atomic\\_and\\_nuclear\\_physics/4\\_7/4\\_7\\_4a.html](http://www.kayelaby.npl.co.uk/atomic_and_nuclear_physics/4_7/4_7_4a.html). [Último acceso: 15 July 2017].
- [4] Eurofusion, «Eurofusion,» 7 6 2017. [En línea]. Available: <https://www.eurofusion.org/glossary/triple-product/>.
- [5] «Tesis Doctorales en Red,» 8 6 2017. [En línea]. Available: <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6598/05Capitulo05.pdf;jsessionid=58BFB27B3F766B5DF79908DD11BC8E1F?sequence=5>.
- [6] F. Cheng, Introduction to plasma physics and controlled fusion, New York : Library of Congress Cataloging in Publication Data , 1974.
- [7] T. J. Dolan, Fusion Research Principles, Experiments and Technology, Library of Congress, 2000.
- [8] D. V. Eester, «ITER and Fusion Energy,» [En línea]. Available: <http://iter.rma.ac.be/en/img/MagneticConfinement.jpg>. [Último acceso: 15 Julio 2017].
- [9] J. A. Wesson, Tokamaks, Clarendon Press, 2004.
- [10] I. S. Carvalho, «Real-time control for long ohmic alternate current discharges,» *Fusion engineering and design*, 2013.
- [11] N. Balshaw, «All-the-World's Tokamaks,» 31 12 2016. [En línea]. Available: <http://www.tokamak.info/>. [Último acceso: 20 06 2017].
- [12] G. D. Garstka, «STARTUP AND STABILITY OF A SMALL SPHERICAL TOKAMAK,» Madison, 1997.
- [13] [En línea]. Available: <https://s-media-cache-ak0.pinimg.com>. [Último acceso: 10 agosto 2017].

- [14] Y.-K. Peng y D. J. Strickler, «Features of spherical torus plasmas,» *Nuclear Fusion*, vol. 26, nº 6, 1986.
- [15] I. Carvalho, «Real-time control for long ohmic alternate current discharges,» Técnico Lisboa, Lisboa, 2013.
- [16] I. S. Carvalho, «Real-time control for long ohmic alternate current discharges,» Técnico Lisboa, Lisboa, 2013.
- [17] O. MITARAI, «STABLE AC TOKAMAK DISCHARGES IN THE STOR-1M DEVICE,» *IOPSCIENCE*, 1987.
- [18] B. TUBBING, «AC PLASMA CURRENT OPERATION IN THE JET TOKAMAK,» *IOPSCIENCE*, 1992.
- [19] I. S. Carvalho, «ISTTOK control system upgrade,» *Fusion Engineering and Design*, 2013.
- [20] I. S. Carvalho, «ISTTOK real-time architecture,» *Fusion engineering and design*, 2013.
- [21] J. Cabral, «Operation of the tokamak ISTOKK in a multicycle alternating flat-top plasma current regime,» *IOPSCIENCE*, 1997.
- [22] J. Huang, «The plasma current profile during current reversal in AC operation of the CT-6B tokamak,» *IOPSCIENCE*, 2000.
- [23] X. YANG, «Alternating current operation with multicycles in the CT-6B tokamak,» *IOPSCIENCE*, 1996.
- [24] J. Li, «Quasi-steady-state ac plasma current operation in HT-7 tokamak,» *IOPSCIENCE*, 2007.
- [25] B. C. Kuo, *Sistemas de control automático*, Séptima ed., Mexico: Prentice Hall Hispanoamerica, 1996.
- [26] S. Bennett, *Real-Time Computer Control*, Second edition ed., India: Pearson Education, 2011.
- [27] M. Shahrokhi y A. Zomorodi, *Comparison of PID Controller Tuning Methods*, Sharif University of technology.
- [28] U. Itkis, *Control systems of variable structure*, New York: Wiley, 1976.

- [29] V.I.Utkin, «Variable structure systems with sliding modes,» *IEEE Transactions Automatic Control*, n° 22, pp. 212-222, 1977.
- [30] S. Spurgeon, «Sliding mode control : a tutorial,» de *European Control Conference (ECC)* , Strasbourg, France, 2014.
- [31] M. C. Saaj, «A New Algorithm for Discrete-Time Sliding-Mode Control Using Fast Output Sampling Feedback,» *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, vol. 49, n° 3, pp. 518-523, 2002.
- [32] P. LeĜniewski y A. Bartoszewicz , «A general switching type reaching law for discrete time sliding mode control systems,» *IEEE*, 2015.
- [33] Diee, «A QUICK INTRODUCTION TO SLIDING MODE CONTROL AND ITS APPLICATIONS,» Universita' Degli Studi Di Cagliari, Cagliari.
- [34] J. Mora, «Diseño del soporte y el control de corriente de las bobinas del Stellarator de Costa Rica 1,» Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, 2014.

## **Anexos**

### **Anexo 1**

Código del DSPIC30F4011 escrito en C

//

```
// Company:                Plasma Innova
// Engineers:              Jaime Mora
//
//
// Create Date:           03/04/2018
// Design Name:           OH control system for ST MEDUSA-CR
// Module Name:           OH control current
// Project Name:          Control current of the coils of ST MEDUSA-CR
// Target Devices:        DSPIC30F4011
// Tool versions:         C, MPLABX
// Description:           Control of an H-bridge with a sliding mode control
//
//
// Dependencies:          stdio.h, stdlib.h, xc.h, math.h, libpic30.h
//
// Revision:
// Revision 0.01 - File Created
// Additional Comments: Se compila con la herramienta MPLABX
//
```

//

```
#include <xc.h>
#include <libpic30.h>
```



```

int i=1;

int cuenta = 1;

//
// configuración del canal analogico y la rutina para leerlo
void ADC_Configuracion(){
    TRISB = 0x01FF; //puerto B todos los pines como entradas
    ADPCFG = 0xFF00; //Puertos B como analogico
    ADCON1 = 0; //limpia el SAMP
    ADCON2 = 0; //Define voltaje de referencia del AVDD y AVSS
    ADCON3 = 0x0005; //muestreo manual, ADCS=5 -&gt; Tas=3*Tc
    ADCON1bits.ADON = 1; //enciende el ADC
}

unsigned int Lectura_canal_analogico(int canal){
    ADCHS = canal;
    ADCON1bits.SAMP = 1; //inicio del muestreo
    __delay32(30);
    ADCON1bits.SAMP=0; //inico de la conversion a digilta
    while(!ADCON1bits.DONE); //espera a la conversion de datos
    return ADCBUF0; //retorno del dato convertido, valor entre 0 y 1023
}

//confirugración del timer
void TIMER_Interrupcion_configuracion()
{
    // CONFIGURACION del timer 4 para crear interrupcion para el PID.
    // el periodo debe ser de PR4 de 1ms .

```

```

// Period = PR4 * prescaler * Tcy = 300 * 1 * 33.33ns = 100us
T4CON = 0;      // Clear Timer 4 configuration
T4CONbits.TCKPS = 0; // Set timer 4 prescaler (0=1:1, 1=1:8, 2=1:64, 3=1:256)
PR4 =299 ;     // Set Timer 4 period (max value is 65535)
_T4IP = 1;     // Set Timer 4 interrupt priority
_T4IF = 0;     // Clear Timer 4 interrupt flag
_T4IE = 1;     // Enable Timer 4 interrupt
T4CONbits.TON = 1; // Turn on Timer 4
}

```

//interrupcion que es lo que hace en ese momento, contiene el control

```
void __attribute__((__interrupt__, __auto_psv__)) _T4Interrupt(void)
```

```
{
```

```
    // Clear Timer 1 interrupt flag
```

```
    _LATD3 = 1- _LATD3;
```

```
    _T4IF = 0;
```

```
    //if (cuenta < 10001) {
```

```
    dato_medido = Lectura_canal_analogico(0);
```

```
    error = dato_medido-table[e] ;
```

```
        if (error < 0) {
```

```
            _LATE0 = 1;
```

```
            _LATE1 = 0;
```

```
        }
```

```
        if (error > 0) {
```

```

        _LATE0 = 0;
        _LATE1 = 1;
    }
    if (error == 0) {
        _LATE0 = 0;
        _LATE1 = 0;
    }

// _LATF0 = 1 - _LATF0;

if (i>4){
    e=e+1;
if (e>499){
    e=0;
}
    i=0;
}
    i=i+1;
    // _LATD3 = 0;
    // cuenta = cuenta +1;
    //}

}

```

```

/*
*
*/

int main(int argc, char** argv) {

    ADC_Configuracion();

    //configuro los leds de la placa para probar la interrupcion
    _TRISF0 = 0; //puerto del led de la placa
    _LATF0 = 0;
    _TRISE0 = 0;
    _TRISE1 = 0;
    _LATE0 = 1;
    _LATE1 = 1;
    _TRISD3 = 0;
    //_TRISE3 = 0;
    //_LATE3 = 1;
    _LATD3 = 1;
    _LATD3 = 0;
    //_TRISE4 = 0;
    //cuenta = 11000;
    TIMER_Interrupcion_configuracion();
    while (1){
        //if (_RD3 == 1){
            //_LATD3 = 1-_LATD3;
            // __delay32(150000000);
            // cuenta = 1;

```

```

    //}
}
return (EXIT_SUCCESS);
}

```

## Anexo 2

### Código en Matlab para el cálculo del PID

```

[tamano, valorx]=size(tout);
dt=0.1/tamano;
t=0:dt:0.1;
y=CorrientedesalidaBUCKescalon.Iout;
dy=diff(y)/dt;
[m,p]=max(dy);
yi=y(p);
ti=t(p);
l=ti-yi/m;
tao=(y(end)-yi)/m+ti-l;
kp=1.2*(tao/l);
Ti=2*l;
Td=0.5*l;
Ts=0.001;
k1=kp*(1+(Ts/Ti)+(Td/Ts));
k2=kp*(1+2*(Td/Ts));
k3=Td/Ts;

```