

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN



ESTUDIOS DE TURBULENCIA Y TRANSPORTE EN EL PLASMA ECRH
DEL STELLARATOR SCR-1

Informe Final

Investigador coordinador:
Dr. Iván Vargas Blanco
2024

Índice general

1. Código y título del proyecto	1
2. Autores y direcciones	1
3. Resumen	2
4. Palabras clave	3
5. Introducción	4
6. Marco teórico	7
6.1. Sonda de Langmuir	7
6.2. Transporte turbulento en el borde del plasma	8
6.3. Electrodo para el control de la turbulencia en el plasma	9
6.4. Convertidor Buck	10
6.5. Controlador PWM	14
6.6. Controlador de corriente	15
6.7. Antena Vlasov	15
6.8. Guía de onda	17
7. Metodología	19
7.1. Circuito del electrodo	19
7.2. Mediciones con sonda de Langmuir	21

7.3. Convertidor Buck DC-DC para el SCR-1	24
7.4. Rectificador de Corriente y Filtrado	25
7.5. Convertidor Buck DC-DC	26
7.6. Control por medio de PWM	27
7.7. Propagación de ondas a través de la cámara de vacío del SCR-1	30
8. Resultados	36
8.1. Implementación del circuito del electrodo	36
8.2. Mediciones con sonda de Langmuir	37
8.3. Circuitos de alimentación	47
8.4. Propagación de ondas	47
9. Discusión y conclusiones	54
9.1. Implementación del circuito del electrodo y medición con sonda de Langmuir . . .	54
9.2. Circuitos de alimentación	55
9.3. Propagación de ondas	56
10.Recomendaciones	58
Referencias	59

1. Código y título del proyecto

Código del proyecto: 5401-1450-1801

Título del proyecto: Estudios de turbulencia y transporte en el plasma ECRH del stellarator SCR-1

2. Autores y direcciones

Investigador coordinador: Dr. Iván Vargas Blanco
Dirección electrónica: ivargas@tec.ac.cr

Investigador colaborador: M.Sc. Luis Alonso Araya Solano
Dirección electrónica: luaraya@tec.ac.cr

Investigadora colaborador: Ing. Ana María Murillo Morgan, Licenciada en Ingeniería en Mecatrónica
Dirección electrónica: amurillo@tec.ac.cr

Investigador colaborador: M.Sc. Jose Esteban Pérez Hidalgo
Dirección electrónica: jose.perez@tec.ac.cr

Investigador colaborador: Bach. Ricardo Adolfo Solano Piedra
Dirección electrónica: risolano@tec.ac.cr

3. Resumen

Este informe de investigación tiene como objetivo principal caracterizar el transporte y la turbulencia de partículas, además de controlar la corriente eléctrica en las bobinas del stellarator SCR-1 y optimizar el calentamiento del plasma. Para ello, se estableció la naturaleza de las turbulencias y su control mediante campos eléctricos externos, se desarrolló un sistema de conversión de energía para regular la corriente y se diseñó una antena para optimizar la deposición de energía en el plasma. La metodología empleada incluye el uso de la sonda de Langmuir para medir parámetros del plasma como el potencial flotante y la corriente de saturación iónica. Además, se introdujo experimentalmente un electrodo para generar un campo eléctrico externo en el plasma y se realizaron simulaciones con BS-SOLCTRA para el campo magnético helicoidal. Se diseñó un convertidor de energía para asegurar un suministro eléctrico eficiente y seguro. Los resultados mostraron que la implementación de un campo eléctrico radial en el borde del plasma puede inducir un flujo poloidal cizallado, que suprime la turbulencia en esa región. El convertidor de buck fue catalogado como crucial para la regulación precisa y estable de la corriente en las bobinas. Se dimensionaron los componentes electrónicos para manejar las especificaciones de corriente y voltaje requeridas. Se diseñó una antena Vlasov modificada, la cual demostró, en las simulaciones, que la nueva configuración de la antena Vlasov mejoró la distribución de las ondas electromagnéticas en la cámara de vacío del SCR-1.

4. Palabras clave

Stellarator, ECRH, Turbulencias, Antena Vlasov, Convertidor Buck DC-DC

5. Introducción

Desde 2016, el Tecnológico de Costa Rica (TEC) ha iniciado investigaciones experimentales en dispositivos de confinamiento magnético tipo stellarator en su Laboratorio de Plasmas para Energía de Fusión y Aplicaciones. Este laboratorio está equipado con el stellarator SCR-1, facilitando a las personas investigadoras el estudio de los procesos físicos asociados con el confinamiento magnético de plasmas, con el objetivo de aportar conocimientos sobre el proceso de fusión termonuclear controlada (Grajales et al., 2016). En relación con las políticas institucionales, este proyecto se enmarca dentro de la línea de investigación en plasmas la cual fue declarada de interés institucional (sesión ordinaria No 2647, Artículo 16, del 4 de febrero de 2010) e interés público (decreto N°36569-MICIT publicado en La Gaceta N°93 del lunes 16 de mayo del 2011) por parte del Gobierno de la República (Instituto Tecnológico de Costa Rica, Consejo Institucional, 2010; Gobierno de Costa Rica, 2011).

Las sondas de Langmuir y otros sistemas de diagnóstico del plasma son herramientas fundamentales para investigar el comportamiento de este. Estas sondas son relativamente simples en cuanto a funcionamiento y construcción, además que proporcionan información detallada sobre la densidad, temperatura y transporte de energía en las capas exteriores del plasma. Los flujos de iones y electrones que escapan en el borde del plasma indica la efectividad del confinamiento magnético, lo cual es posible estudiar mediante el uso de este diagnóstico (Chen and Chang, 2003). El estudio del transporte de partículas, momentum y energía en plasmas toroidales confinados magnéticamente es crucial para el desarrollo de reactores de fusión nuclear eficientes. Existen dos conceptos de transporte de partículas, uno es el transporte local, donde el gradiente local determina únicamente el flujo radial local con un coeficiente de difusión basado en las leyes de Fick. Aquí, el coeficiente de difusión depende de varios parámetros locales del plasma y satisface el cierre local. Existe una contribución significativa del término no difusivo (flujo radial que no depende del gradiente) en el transporte de partículas y momento. El otro es el transporte no local, donde el flujo radial local se determina globalmente (Ida, 2022). En este proyecto se busca analizar los procesos de confinamiento magnético y transporte local de energía en el SCR-1 utilizando una sonda de Langmuir. Si bien esta sonda se ha utilizado previamente para medir la temperatura electrónica y la densidad electrónica, se requieren nuevos enfoques para medir el transporte de partículas en el borde del plasma.

La física de plasmas es un campo de estudio con un amplio abanico de aplicaciones. En la actualidad, uno de sus focos principales es la investigación sobre la fusión termonuclear controlada, donde se está desarrollando ciencia y tecnología con el potencial de revolucionar la generación de energía limpia. La fusión termonuclear controlada se basa en la unión de núcleos ligeros, como los isótopos de hidrógeno, para formar núcleos más pesados, liberando una enorme cantidad de energía en el proceso. Este fenómeno es el mismo que alimenta al Sol y a las estrellas, y reproducirlo en

la Tierra podría proporcionar una fuente de energía prácticamente inagotable y sin las emisiones contaminantes asociadas a los combustibles fósiles o residuos nucleares como la fisión nuclear. La investigación en fusión termonuclear controlada se ha intensificado en las últimas décadas, impulsada por el potencial que ofrece como solución energética limpia y segura. A diferencia de la fisión nuclear, que implica la división de núcleos atómicos más pesados, la fusión no produce residuos radiactivos de larga vida, lo que la convierte en una opción ambientalmente más atractiva. Sin embargo, recrear las condiciones extremas del Sol en la Tierra implica una serie de retos. Las personas científicas se enfrentan a numerosos desafíos técnicos, como la contención del plasma a través de campos magnéticos intensos, el desarrollo de materiales resistentes a las altas temperaturas y la optimización del proceso de fusión para lograr una producción de energía eficiente (IAEA, 2012).

El control preciso de la corriente suministrada a las bobinas al generar plasma en un equipo como el stellarator impacta directamente el éxito y la fiabilidad de los resultados obtenidos. Una corriente fluctuante puede generar interferencias electromagnéticas que afectan otros sistemas o componentes electrónicos cercanos dentro del laboratorio de investigación. Además, puede provocar picos de tensión o la generación de arcos eléctricos, presentando riesgos de seguridad tanto para los operadores como para el equipo. Un control adecuado de la corriente asegura la estabilidad del plasma, ya que dicha estabilidad depende directamente de la energía suministrada. Esto permite investigar escenarios de plasma confinado de gran interés científico, incluyendo aumentos significativos en la temperatura y densidad electrónica (Ariola et al., 2008). Debido a la magnitud de la corriente presente en las bobinas del stellarator, el control se puede conseguir mediante reguladores que utilizan convertidores de potencia con control de corriente AC/DC o DC/DC, dependiendo de la fuente de alimentación primaria. La elección del convertidor adecuado y la implementación de las medidas de protección necesarias son aspectos fundamentales para lograr un control eficiente y seguro. La propuesta de un convertidor mixto presenta una alternativa prometedora para simplificar el sistema actual y mejorar su rendimiento según González and Martínez (2020).

Para optimizar las descargas en el SCR-1, es fundamental maximizar la eficiencia del calentamiento del plasma. Para ello, se requiere diseñar una antena interna para el calentamiento por microondas, teniendo en cuenta las restricciones del SCR-1. Es prioritario estudiar y cuantificar las limitaciones del SCR-1 para diseñar una antena interna con mínimas pérdidas que mejore la densidad y temperatura electrónicas del plasma. Adicionalmente, es importante identificar la física relacionada con el plasma generado por el SCR-1 y la implementación de un ambiente de simulación que permita visualizar la interacción de estas con la antena. La antena Vlasov presenta una versatilidad al realizarle modificaciones, estas pueden ser el variar el ángulo de corte para una antena simple, realizar un corte transversal diferente o añadir un reflector a la antena, de igual manera es importante tomar en cuenta su manipulación por lo que esta no debe presentar filos que puedan dañar el equipo o ser peligroso a la hora de manipularlo (Anderson, 2020).

Este proyecto se planteó con el siguiente objetivo general así como los objetivos específicos que se indican a continuación:

Objetivo general:

Caracterizar el transporte y la turbulencia de partículas mediante la optimización del calentamiento del plasma y la regulación de la corriente eléctrica suministrada a la configuración de bobinas del Stellarator SCR-1

Objetivos específicos

- OE.1 Determinar el transporte y las turbulencias de partículas en el plasma del stellarator SCR-1.
- OE.2 Establecer la naturaleza de las turbulencias y su control mediante la acción de campos eléctricos externos.
- OE.3 Desarrollar un sistema de conversión de energía para regular la corriente eléctrica en las bobinas del SCR-1 que incluya un sistema conexión/desconexión de emergencia de forma automática y un sistema de enfriamiento para garantizar eficiencia y seguridad en el sistema de alimentación eléctrica.
- OE.4 Implementar una antena para el sistema de calentamiento que permita optimizar la deposición de energía en el plasma.

El método de investigación cuantitativo fue elegido debido a su capacidad para proporcionar mediciones precisas y datos numéricos que son fundamentales para los objetivos del estudio. La realización de trabajo experimental con descargas de plasmas permitió obtener datos empíricos directos sobre el comportamiento del plasma en condiciones controladas de laboratorio. Estos datos fueron complementados con análisis computacionales detallados, que no solo facilitaron la visualización de las superficies de flujo de campo magnético y la propagación de ondas electromagnéticas, sino que también permitieron calcular parámetros críticos relacionados con las turbulencias del plasma y los requisitos de diseño para un convertidor de corriente eléctrica. Esta combinación de enfoques experimentales y computacionales aseguró una investigación integral y rigurosa, proporcionando una base sólida para la formulación de conclusiones y recomendaciones en el contexto del desarrollo del dispositivo SCR-1.

6. Marco teórico

6.1. Sonda de Langmuir

El diagnóstico del plasma llamado sonda simple de Langmuir se emplea para evaluar localmente parámetros del plasma, como su temperatura, densidad y potencial eléctrico. La sonda consiste en una varilla metálica, hecha de un material conductor capaz de soportar altas temperaturas. Por lo general, se emplea tungsteno debido a su elevado punto de fusión. El aislante y el blindaje proporcionan protección a la punta para evitar su degradación por la interacción con el plasma, además de evitar que recolecte corrientes o potenciales eléctricos que puedan distorsionar las mediciones (Chen and Chang, 2003).

La sonda de Langmuir también se puede utilizar para realizar mediciones en el stellarator que permitan entender los mecanismos que causan pérdidas de energía y de partículas en el plasma. Uno de estos es el transporte de partículas hacia el exterior del plasma por fenómenos de turbulencia. En dispositivos tipo stellarator se ha observado la presencia de fluctuaciones que se propagan hacia la capa externa del plasma, conocida como la *scrape-off layer* (SOL, siglas en inglés). Esta es una capa externa del plasma que se ubica después de la última superficie de flujo magnético. Dichas fluctuaciones son causadas por no linealidades de los parámetros del plasma y son indeseadas debido a que causan que las partículas escapen del confinamiento magnético y choquen contra las paredes del dispositivo (Melnikov et al., 2013).

La curva característica de corriente-voltaje, que se muestra en la Figura 6.1, se obtiene experimentalmente mediante la creación de un diagrama de dispersión de los valores de corriente del plasma en función del potencial flotante de una alimentación externa conectada a tierra con respecto al plasma. La curva característica considera al plasma como cuasineutro, sin magnetizar, con un camino libre medio mucho mayor que el radio de la sonda y la longitud de Debye (sin colisiones), un grosor de la punta de plasma mucho menor que el radio de la sonda (efectos de borde despreciables) y una distribución de velocidades isotrópica para los electrones. En este modelo, se inserta una sonda plana con un área de recolección de partículas cargadas menor que las dimensiones del plasma.

A partir de lo anterior, es posible medir la corriente iónica (J_i) que se alcanza cuando el potencial aplicado a la sonda es suficientemente negativo como para repeler todos los electrones del plasma. Se obtiene como el intercepto de la recta de mejor ajuste en la región lineal de voltaje flotante negativo de la curva característica corriente-voltaje. En el caso del potencial flotante (Φ_w), es el potencial al que la sonda debe estar para que la corriente neta sea cero. En otras palabras, es el

punto donde la corriente iónica y la corriente electrónica se igualan. Se determina como el punto de intersección con el eje de las abscisas en la curva característica corriente-voltaje.

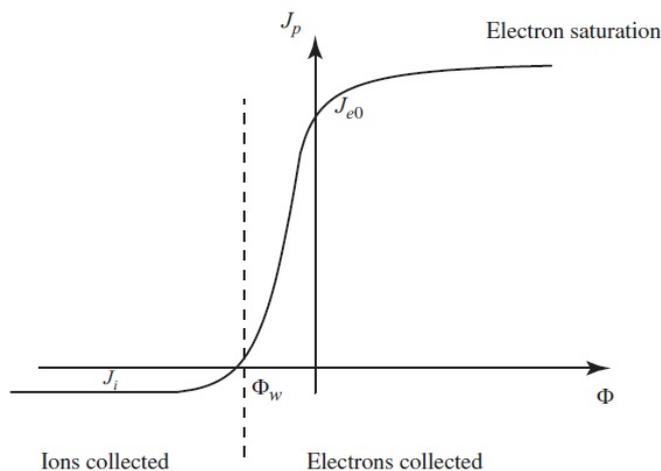


Figura 6.1: Curva de corriente eléctrica recolectada en función del voltaje aplicado predicha por la teoría. Fuente: (Inan and Golkowski, 2011)

6.2. Transporte turbulento en el borde del plasma

En la periferia de los dispositivos de fusión, surge un desafío significativo debido a la pérdida aumentada de partículas y energía. La eficiencia de los stellarators se ve considerablemente reducida a medida que estas pérdidas ampliadas en los límites deterioran las condiciones de confinamiento. Aquí, las líneas del campo magnético se extienden y el plasma interactúa vigorosamente con partículas neutras, lo que tiene un impacto directo en su equilibrio de partículas y energía. La investigación del borde del plasma es esencial para entender el comportamiento global del plasma y mejorar el rendimiento de los dispositivos de fusión. Tanto el borde como en la SOL suelen exhibir estructuras turbulentas y fluctuaciones electrostáticas. Estos fenómenos dominan las pérdidas de partículas y energía, limitando considerablemente las condiciones de confinamiento generales. En este contexto, varios estudios del borde, realizados en dispositivos con diferentes parámetros, buscan comprender exhaustivamente los procesos físicos que generan la turbulencia en el borde y las restricciones que imponen al confinamiento del plasma (Bisai and Sen, 2023).

Las pérdidas en los dispositivos de confinamiento magnético no son continuas, sino que ocurren de manera intermitente debido a la convección radial de estructuras turbulentas, conocidas como filamentos o *blobs*. Estas fluctuaciones muestran un comportamiento intermitente en sí mismos, con tiempos de vida cortos que les permiten aparecer y desaparecer en el borde del plasma en cuestión de microsegundos (Yoshizawa et al., 2002).

El movimiento radial de estructuras de los blobs en el plasma genera ráfagas de gran amplitud

en mediciones de un solo punto. Un análisis reciente de largas series de datos de mediciones con sondas e imágenes ha permitido comprender las propiedades estadísticas de estas ráfagas. Las amplitudes y los tiempos de espera de las ráfagas siguen una distribución exponencial, mientras que la duración de las ráfagas es constante. La forma de onda de las ráfagas de gran amplitud se describe bien con una función exponencial. Basándose en estas características, se ha desarrollado modelos estocásticos para describir las fluctuaciones intermitentes del plasma en la SOL (Garcia et al., 2016).

Esto incluye la densidad electrónica del plasma $\hat{n}_e(t)$ y la velocidad radial de las partículas cargadas del plasma $\hat{v}_r(t)$, donde la tilde representa las fluctuaciones de una cantidad dada en el tiempo, expresadas como

$$\hat{n} = n - \langle n \rangle \quad (6.1)$$

Los niveles anómalos de transporte neto radial, Γ , surgen de las fluctuaciones correlacionadas de la densidad del plasma y la velocidad radial, además de la velocidad poloidal, dado por

$$\Gamma_r \simeq \langle \tilde{n}_e \tilde{v}_r \rangle \propto \frac{\langle \tilde{I}_s \tilde{E}_\theta \rangle}{B} \quad (6.2)$$

$$\tilde{E}_\theta = -\frac{\Delta \tilde{V}_f}{d} \quad (6.3)$$

$$v_r = \frac{\langle \tilde{I}_s \tilde{E}_\theta \rangle}{I_s B} = \frac{\Gamma_r}{I_s} \quad (6.4)$$

$$v_\theta = \frac{\tilde{E}_r}{B} \quad (6.5)$$

Donde I_s es la corriente de saturación iónica, E_θ es el campo eléctrico poloidal, B es la magnitud del campo magnético, ΔV_f es la diferencia de potencial flotante, d es la distancia entre el electrodo con el campo eléctrico externo y el electrodo de referencia y E_r es el campo eléctrico radial. A partir de la ecuación (6.4), un campo eléctrico radial puede ocasionar cambios significativos en las órbitas de las partículas cargadas. Este campo induce una deriva tangencial a lo largo de la superficie del flujo magnético, con una componente poloidal que disminuye la velocidad poloidal de las partículas y contrarresta la velocidad radial, manteniendo así las partículas en una trayectoria helicoidal. Por lo tanto, la introducción de una deriva $\vec{E} \times \vec{B}$ mediante un campo eléctrico externo mejora el confinamiento del plasma (Dinklage et al., 2005)."

6.3. Electrodo para el control de la turbulencia en el plasma

Un electrodo (*biasing electrode*) es un dispositivo que genera una diferencia de potencial y se diseña con diversas formas y materiales. Su función principal es influir en el comportamiento eléctrico de un medio que puede verse afectado por campos eléctricos externos. Al introducir un electrodo de este tipo dentro del flujo turbulento del plasma de un stellarator, por ejemplo, se produce un efecto de estabilización del flujo, lo que a su vez mejora el confinamiento del plasma. Por esta razón, el diseño de un electrodo con dimensiones específicas es crucial para generar un campo eléctrico con los efectos deseados en el flujo de plasma (Hidalgo et al., 2003).

Los electrodos se pueden diseñar para que tengan forma de disco, hemisferio, cilindro u otras formas. Además, se pueden construir de diversos materiales: acero, tungsteno, molibdeno y grafito,

por ejemplo como menciona Grenfell et al. (2018); Salar Elahi et al. (2012). El diseño del dispositivo debe tomar en cuenta parámetros físicos como el voltaje y la corriente eléctrica que pueda transportar. Un factor adicional a tomar en cuenta es el posicionamiento del electrodo dentro del flujo turbulento del plasma (Salar Elahi et al. (2012)).

Existen trabajos recientes sobre la incidencia de electrodos polarizados de producción de campo eléctrico en el confinamiento dinámico tanto en tokamaks como en configuraciones stellarator, como mencionan (Nascimento et al., 2005; Weynants et al., 1992; Salar Elahi et al., 2012; Ghoranneviss et al., 2010). Sin embargo, estos trabajaron no profundizaron en los detalles de implementación del electrodo a nivel técnico, o no se dieron razones del porqué de ciertos parámetros de dimensiones o intensidad de variables como el campo o potencial eléctrico.

En el trabajo de Nascimento et al. (2005) se presentó un electrodo móvil hecho de grafito duro, con la forma de un disco de 20 mm de diámetro y 9 mm de espesor, y un eje de 30 mm de longitud y 20 mm de diámetro en la punta de un cilindro de acero inoxidable cubierto de alúmina. El electrodo podía introducirse hasta 2 cm dentro del plasma, sin interrupciones del mismo, para voltajes de hasta 470 V y -400 V. Estaba ubicado en el plano ecuatorial del tokamak. La ruta de la corriente del electrodo para la polarización positiva se ilustran en la Figura 6.2. El voltaje aplicado al electrodo se medía entre el electrodo y el recipiente, usando una resistencia de $31\text{ m}\Omega$ para medir la corriente y una resistencia de $1\ \Omega$ para limitarla.

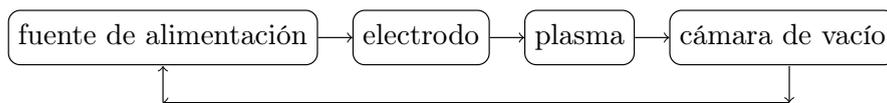


Figura 6.2: Diagrama de la ruta de la corriente eléctrica por electrodo. Fuente: elaboración propia

En Weynants et al. (1992) se describió un electrodo con mayor detalle. Este electrodo constaba de una cabeza de carbono en forma de canoa, con una longitud de 13 cm, una anchura de 3,5 cm y una altura de 1,5 cm, montada sobre un eje de acero alojado en una funda aislante hecha de nitruro de boro. El electrodo se insertaba en el plasma, con su lado más largo alineado con la dirección toroidal. Se aplicaba un voltaje de polarización entre el electrodo y ocho terminales en la cámara de vacío.

La idea general sobre la puesta a punto del electrodo, es su ubicación en un lugar conveniente, aparte de su correcta aplicación en términos de frecuencia y voltaje, tomando en cuenta que la cizalladura del flujo (*flow shear*) en el borde también se puede modificar con un electrodo polarizado externamente que mejora o reduce el gradiente del campo eléctrico radial. Esta técnica se ha utilizado para modular el borde del plasma tanto en tokamaks como en stellarators, según Grenfell et al. (2018). En la Figura 6.3 se visualiza la ubicación del electrodo en el stellarator TJ-II.

6.4. Convertidor Buck

Como se mencionó en la introducción (sección 5), la regulación precisa y estable de la corriente eléctrica por las bobinas del stellarator SCR-1 es de suma importancia. Esta regulación se puede lograr mediante una variedad de métodos, que van desde los más simples, utilizando resistencias, hasta los más complejos, como los controladores de corriente basados en sensores y retroalimenta-

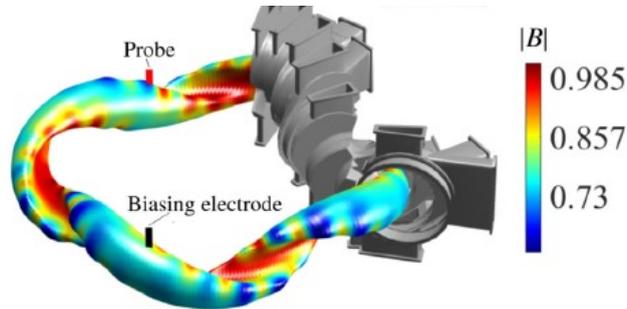


Figura 6.3: Ubicación del electrodo en el TJ-II. Fuente: Grenfell et al. (2018)

ción. Para este proyecto, se optó por utilizar un convertidor de potencia con control de corriente tipo buck o *step-down*, debido a su alta eficiencia y su capacidad para manejar grandes magnitudes de corriente. Un regulador buck es un tipo de convertidor de corriente continua a corriente continua (DC-DC) que reduce un voltaje de entrada más alto a un voltaje de salida más bajo, manteniendo la eficiencia energética (Mohan et al., 2002).

El convertidor buck opera a través de un ciclo de conmutación que alterna entre dos estados: el estado de encendido (*ON*) y el estado de apagado (*OFF*). La conversión eficiente se logra mediante el control del ciclo de trabajo (D), que es la fracción del tiempo durante la cual el interruptor permanece en el estado de encendido en cada ciclo de conmutación. El método más común para controlar el ciclo de trabajo es la modulación por ancho de pulsos (*PWM*). En la Figura 6.4 se observa el diagrama del circuito de potencia de un convertidor buck.

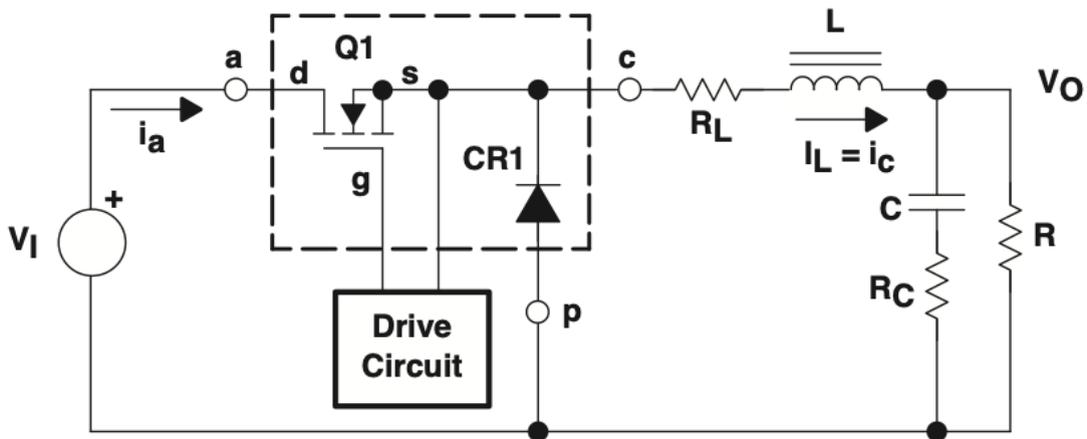


Figura 6.4: Esquemático del circuito de potencia de un convertidor buck. Fuente: Instruments (2015)

Los componentes clave para este circuito, de acuerdo con Pressman et al. (2009), son los siguientes:

1. Interruptor ($Q1$): este componente controla la conexión y desconexión del voltaje de entrada V_I . Normalmente se elige un *Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor* (MOSFET) o un *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT).
2. Diodo ($CR1$): este componente proporciona una ruta para la corriente del inductor, permitiendo que fluya hacia la carga cuando el interruptor se apaga.
3. Inductor (L): la función de este componente es suavizar las fluctuaciones de corriente. Cuando el interruptor se encuentra encendido el inductor almacena energía; por el contrario, cuando el interruptor está apagado el inductor libera energía.
4. Capacitor (C): similar al comportamiento del inductor, el capacitor suaviza las fluctuaciones, pero esta vez de voltaje proporcionando un voltaje de salida V_O estable.
5. Controlador PWM (*Drive Circuit*): circuito encargado de controlar el ciclo de trabajo del interruptor. Con este se pretende ajustar el ciclo de trabajo para mantener el voltaje de salida V_O constante frente a variaciones en el voltaje de entrada V_I o la carga misma.

Para comprender el funcionamiento de este circuito se toman en cuenta dos posiciones en el interruptor: la posición cerrada (encendido) y la posición abierta (apagado) (Erickson and Maksimovic, 2007). Primero, la posición cerrada se conoce como estado encendido. En la Figura 6.5 se muestra el circuito equivalente del convertidor.

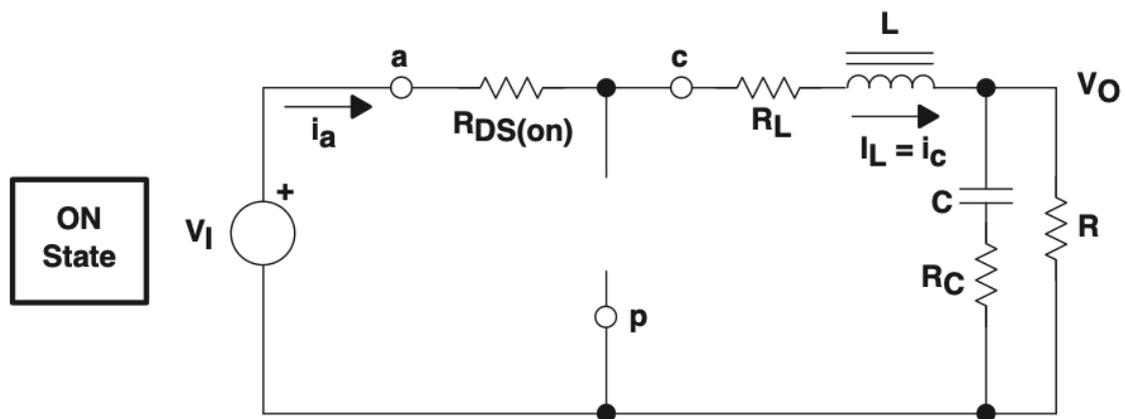


Figura 6.5: Circuito equivalente del estado encendido del convertidor buck. Fuente: Instruments (2015)

En este primer estado, el interruptor $Q1$ se cierra, conectando el voltaje de entrada V_I con el inductor L . La corriente a través del inductor aumenta linealmente y el diodo D está polarizado inversamente, por lo que no conduce. Finalmente, el capacitor C se carga y suministra energía a la carga.

A continuación, se explica la posición abierta, conocida como el estado de apagado. En la Figura 6.6 se muestra el circuito equivalente del convertidor para esta posición del interruptor.

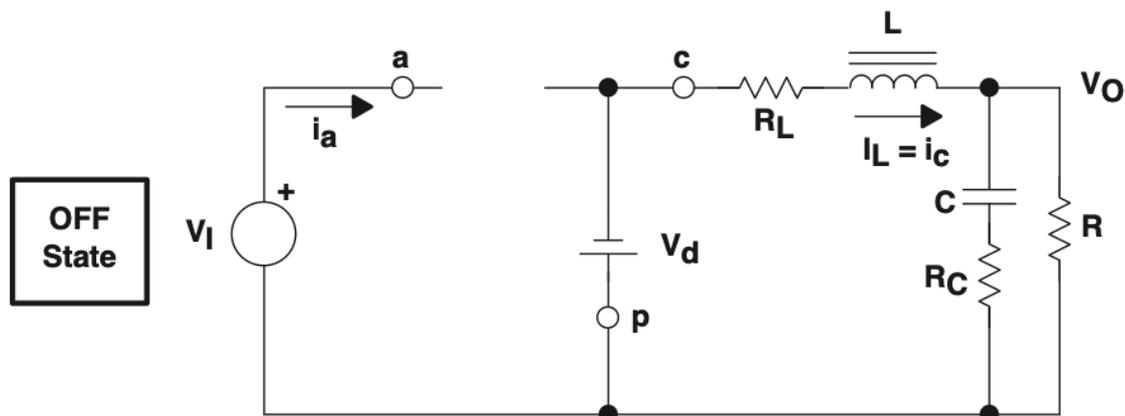


Figura 6.6: Circuito equivalente del estado apagado del convertidor buck. Fuente: Instruments (2015)

En este segundo estado, el interruptor $Q1$ se abre, desconectando V_I del inductor L . Para mantener el flujo de corriente hacia la carga y el diodo D , el inductor libera su energía almacenada, lo que provoca una disminución lineal de la corriente a través de él. Durante este estado, el capacitor C contribuye a mantener estable el voltaje de salida.

En el trabajo de Erickson and Maksimovic (2007), se proveen las siguientes ecuaciones para el diseño de un convertidor buck:

1. Relación de voltaje:

- Es la relación entre el voltaje de salida V_O de un convertidor de potencia y el voltaje de entrada V_I . Se define por la ecuación:

$$V_O = D \cdot V_I \quad (6.6)$$

donde D es el ciclo de trabajo (*duty cycle*), que representa la fracción del periodo de conmutación durante el cual el interruptor está encendido.

2. Corriente media del inductor (I_L):

- Es la corriente promedio que circula por un inductor en un circuito conmutado. Se calcula mediante la fórmula:

$$I_L = \frac{I_{OUT}}{1 - D} \quad (6.7)$$

donde I_{OUT} es la corriente de salida del convertidor y D es el ciclo de trabajo, donde este último está dado por

$$D = \frac{t_{ON}}{T} \quad (6.8)$$

donde t_{ON} es el tiempo durante el cual el interruptor está encendido, y T es el periodo del ciclo de conmutación.

3. Rizado de corriente del inductor (ΔI_L):

- Se refiere a la fluctuación de la corriente a través del inductor durante su operación. En circuitos de potencia conmutados, este rizado se debe a la naturaleza pulsante de la señal de entrada y a la conmutación de dispositivos semiconductores. La expresión para calcularlo es:

$$\Delta I_L = \frac{V_I - V_O}{Lf} \cdot D \quad (6.9)$$

donde L es la inductancia del inductor, V_I y V_O son los voltajes de entrada y salida respectivamente.

4. Rizado de voltaje del capacitor (ΔV_O):

- Es la variación de voltaje en la salida del convertidor, típicamente filtrado por un capacitor. Se calcula mediante la relación:

$$\Delta V_O = \frac{\Delta I_L}{8fC} \quad (6.10)$$

donde ΔI_L es el rizado de corriente del inductor, f es la frecuencia de conmutación del convertidor, y C es la capacitancia del capacitor de salida.

Los convertidores tipo Buck funcionan con corriente directa, por lo que resulta necesaria una etapa previa de rectificación de la corriente proveniente del transformador trifásico que estará conectado a la red eléctrica. Los rectificadores de diodos se utilizan para proporcionar un voltaje fijo a equipos alimentados por corriente continua. También se emplean como fuentes de alimentación para convertidores electrónicos de potencia de entrada de corriente continua, como inversores y *choppers*. En los convertidores tipo chopper, es más común controlar la salida de voltaje mediante la modulación por ancho de pulso (PWM). Sin embargo, en ciertas aplicaciones, es la corriente de salida la que requiere control directo. Esto demanda un sistema de control en lazo cerrado que imponga patrones de conmutación en el chopper de manera que la corriente real siga la señal de referencia deseada. En la práctica, los inversores controlados por corriente son más comunes que los choppers controlados por corriente, y sus sistemas de control de corriente son muy similares a los de los choppers (Trzynadlowski, 2015).

6.5. Controlador PWM

La modulación por ancho de pulso *PWM* es una técnica ampliamente utilizada en electrónica para controlar la cantidad de energía entregada a una carga, logrando una alta eficiencia. Se aplica principalmente en el control de motores, la regulación de voltajes y en aplicaciones de iluminación. El principio de funcionamiento del PWM se basa en alternar rápidamente entre los estados de encendido y apagado de una señal digital para generar una salida promedio variable (Hart, 2010).

El ciclo de trabajo (*duty cycle*) es fundamental en *PWM* y se define como la proporción del tiempo durante el cual la señal permanece encendida dentro de un período de conmutación. Variando el ciclo de trabajo, se puede controlar la cantidad de energía entregada a la carga:

1. Ciclo de trabajo del 0%: La señal está siempre apagada, resultando en una salida promedio de 0V.

2. Ciclo de trabajo del 50%: La señal está encendida y apagada en partes iguales, lo que da como resultado una salida promedio del 50% del voltaje máximo.
3. Ciclo de trabajo del 100%: La señal está siempre encendida, resultando en una salida promedio del voltaje máximo.

El *PWM* permite un control preciso del voltaje de salida y es altamente eficiente al minimizar la disipación de calor (Hart, 2010). Esto se debe a que los dispositivos de conmutación, como los transistores, operan en sus estados más eficientes: completamente encendidos (saturación) o completamente apagados (corte), reduciendo así las pérdidas de energía.

6.6. Controlador de corriente

El control de corriente es un aspecto fundamental en el campo de la electrónica de potencia y sistemas eléctricos modernos. Se refiere al manejo preciso y eficiente de la corriente eléctrica que fluye a través de dispositivos y circuitos, con el objetivo de cumplir ciertas especificaciones de rendimiento, protección y eficiencia en sistemas eléctricos y electrónicos. En aplicaciones prácticas, el control de corriente permite regular la cantidad de corriente que fluye a través de componentes como motores, transformadores, fuentes de alimentación conmutadas y otros dispositivos electrónicos. Esto es crucial para garantizar un funcionamiento seguro y optimizado de los equipos, así como para cumplir con requisitos específicos de diseño y normativas de eficiencia energética. Los controladores de corriente pueden implementarse utilizando diferentes técnicas y dispositivos electrónicos, como circuitos analógicos y digitales, microcontroladores, DSPs (procesadores digitales de señales) y técnicas de control avanzadas como el control PWM (modulación por ancho de pulso) (Mohan et al., 2003).

En un convertidor de potencia, como el convertidor BUCK, un controlador PI resulta apropiado para ajustar el ciclo de trabajo del PWM y así mantener una corriente de salida constante, independientemente de las fluctuaciones que pueda presentar la carga. Esto es crucial en aplicaciones donde se requiere un suministro de corriente precisa, como en las bobinas de un stellarator Johnston et al. (2020). La componente proporcional del controlador responde instantáneamente a los errores actuales entre la referencia de corriente y la corriente real (medida) y así ajusta la salida proporcionalmente al error. La componente integral se encarga de eliminar el error acumulado a lo largo del tiempo y ajusta la salida basada en la suma del error pasado y presente, lo que ayuda a eliminar el offset. De forma simplificada, un controlador del tipo PI recibe una señal de error como su entrada y su salida ajusta el ciclo de trabajo del PWM en el convertidor de potencia. Esto garantiza que la corriente siga la referencia establecida de manera precisa y estable Ogata (2010).

6.7. Antena Vlasov

Las antenas Vlasov están compuestas por una guía de onda cilíndrica con corte, lo que les permite irradiar energía en modos de simetría cilíndrica utilizando ondas de guía circular, sin necesidad de un conversor de modo adicional. Esta antena se puede clasificar principalmente en dos tipos. El primero, como se observa en la Figura 6.7, corresponde a la antena Vlasov con corte escalonado,

mientras que el segundo, mostrado en la Figura 6.8, es la antena Vlasov con corte biselado. Una ventaja que ofrece la antena Vlasov con corte biselado es que caso contrario de la antena con corte escalonado esta no tiene las puntas afiladas, por lo cual es más fácil su manipulación, además de ofrecer una forma más sencilla para realizar el corte.

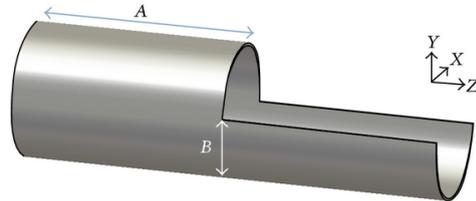


Figura 6.7: Antena Vlasov con corte escalonado. Fuente: Misilmani et al. (2015)

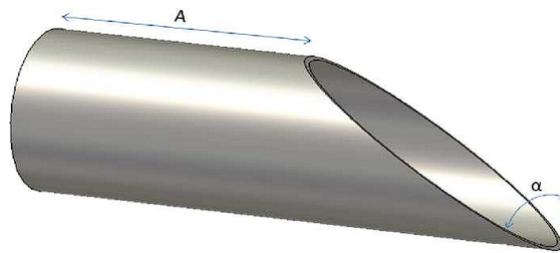


Figura 6.8: Antena Vlasov con corte biselado. Fuente: Misilmani et al. (2015)

En (Misilmani et al., 2015), se realizó una comparación entre estos dos tipos de antena, en las Figuras 6.9 y 6.10 se puede ver el patrón de la radiación de las antenas, en el caso de la antena con corte escalonado ofrece un mejor rendimiento en términos de ganancia máxima y ancho de haz de media potencia. El ancho de haz de media potencia es el ancho angular total entre los dos puntos que están 3dB abajo del pico del haz principal, esto es importante ya que afecta en la medida de qué tan exacto debe apuntarse la antena y qué tan rápidamente la antena rechaza las señales fuera de la región deseada (F. Mouttadi and A. Coronado, 2006). Los lóbulos son haces más pequeñas que están alejadas del haz principal, estos lóbulos laterales suelen ser radiación en direcciones no deseadas que nunca pueden eliminarse por completo, el caso de la antena biselada da como resultado lóbulos laterales más bajos, siendo más idónea para aplicaciones HPM.

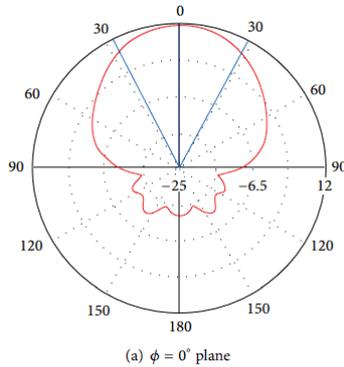


Figura 6.9: Patrones de ganancia para la antena con corte escalado para el plano $\phi = 0^\circ$. Fuente: Misilmani et al. (2015)

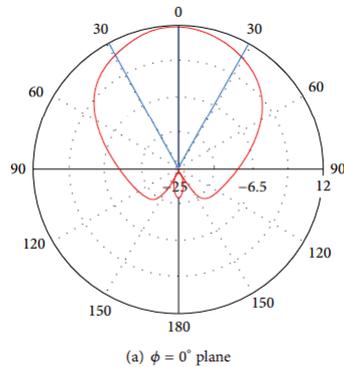


Figura 6.10: Patrones de ganancia para la antena con corte biselado para el plano $\phi = 0^\circ$. Fuente: Misilmani et al. (2015)

6.8. Guía de onda

El transporte de energía se puede realizar mediante guías de onda, que permiten transferir la energía de un punto a otro dentro del medio. Las ondas electromagnéticas viajan a lo largo de una guía de onda en diferentes configuraciones denominadas modos de propagación. En el caso de las guías de onda rectangulares, estas pueden propagar en los modos Transversal Magnético (TM) y Transversal Eléctrico (TE), como se ilustra en la Figura 6.11. En los modos TM, las líneas del campo magnético son completamente transversales a la dirección de propagación de la onda electromagnética, mientras que el campo eléctrico tiene una componente en esa dirección. En los modos TE, las líneas del campo eléctrico son completamente transversales a la dirección de propagación, mientras que el campo magnético tiene una componente a lo largo de dicha dirección. Los distintos modos de propagación, tanto TM como TE, se designan mediante dos subíndices m y n . El primer subíndice indica el número de variaciones de media onda del campo eléctrico en la dimensión ancha de la guía de onda, mientras que el segundo subíndice indica el número de variaciones de media onda del campo eléctrico a lo largo de la dimensión estrecha (en el caso

del modo TE_{mn}). En el modo TM_{mn} , la misma variación se aplica al campo magnético. Cabe mencionar que esta notación de subíndices es específica para guías de onda rectangulares. Las guías de onda rectangulares cuentan con un solo conductor y se utilizan frecuentemente como una de las primeras líneas de transmisión para transportar señales en el rango de microondas (Kuester, 2020; Okamoto, 2021).

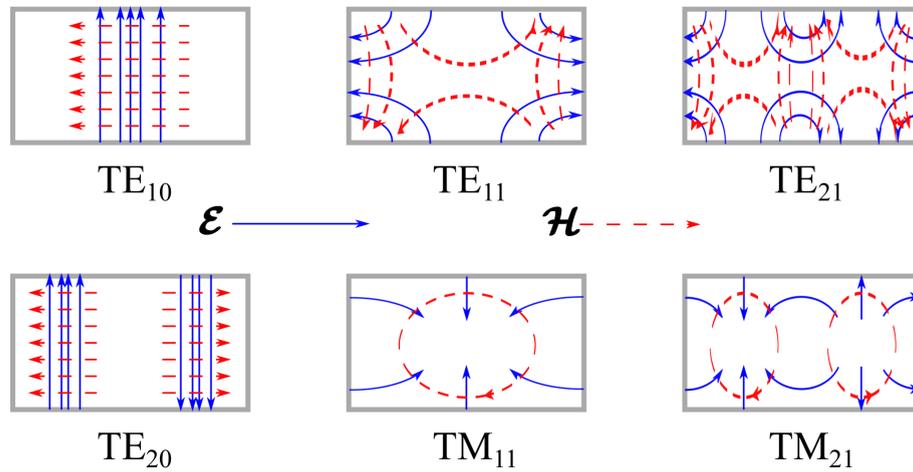


Figura 6.11: Vista frontal de diferentes patrones de guía de onda rectangulares. En rojo se visualiza el campo magnético. En azul se visualiza el campo eléctrico. Fuente: Kuester (2020)

7. Metodología

7.1. Circuito del electrodo

Como se explicó en el marco teórico (sección 6) sobre los electrodos, no se brindan especificaciones técnicas en las referencias estudiadas sobre cómo los electrodos deben implementarse. Además, el propósito y las circunstancias de implementación son muy variables, por lo que se optó por considerar las cualidades básicas pensadas para este, es decir, un electrodo que generara un potencial polarizado (alrededor del valor del potencial flotante del plasma) bajo ciertas frecuencias, la cual se determinaría empíricamente a la hora de hacer las pruebas de afectación medidas con la sonda de Langmuir en las descargas de plasma del SCR-1. Es importante mencionar que inicialmente se consideró la creación un electrodo colocado independientemente en uno de los puertos del stellarator con su propia terminal. El análisis determinó que sería necesaria la manufactura de nuevas piezas de vacío, sin aprovechar las ya existentes en el laboratorio. Además, la primera opción considerada para el electrodo, fue la de un convertidor de potencia, particularmente un inversor de dos etapas de una sola fase. Con lo anterior se buscaba conseguir con un adaptador desde un toma-corriente del laboratorio el pulso deseado, pero esto implicaba la aplicación de diodos (MOSFET) en lo que se conoce como una topología puente H, con características de pulso de trabajo y filtros que no podríamos conocer hasta hacer las pruebas. Dada la complejidad de diseñar un circuito eléctrico que pueda oscilar a una frecuencia precisa y cambiar dicha frecuencia en diversos rangos, se decidió utilizar un generador de funciones. Este dispositivo, comúnmente empleado en laboratorios de electrónica, permite generar las formas de onda necesarias con frecuencias que van desde 0 Hz hasta los 10 kHz. Sin embargo, una limitación del generador de funciones es que los valores de la amplitud de la diferencia de potencial eléctrico que ofrece son relativamente pequeños, oscilando entre 0 V y 10 V. La sonda de Langmuir ofrece la ventaja de que cada una de sus puntas está aislada de las demás, lo que permite la recolección independiente de corriente eléctrica y proporciona alimentación a cada una. Además, esta sonda ha sido mejorada y utilizada eficazmente en varios estudios anteriores, como se menciona en Ortiz Jarquin (2019); Solano-Piedra (2024), para la recolección de parámetros de interés. Cada punta de la sonda cuenta con un distanciamiento y una posición angular adecuados para evitar interferencias en las mediciones. Por lo tanto, se concluyó que lo más apropiado era colocar el electrodo en una de las puntas de la sonda de Langmuir, evitando así la complejidad inherente a un sistema de soporte y posicionamiento adicional.

Los requerimientos iniciales para el desarrollo del circuito eléctrico del electrodo, presentado en la Figura 7.1, incluyeron la capacidad de variar la frecuencia entre 100 Hz y 2000 Hz, una amplitud de voltaje variable alrededor de los 100 V, y la generación de formas de onda sinusoidal y cuadrada. Además, fue necesario que la onda oscilara entre 0 V y valores negativos.

Para alcanzar la amplitud de voltaje requerida, se utilizó un transformador que amplificó la señal de salida del generador de funciones. El transformador seleccionado tiene la capacidad de amplificar la entrada por un factor de 12. De esta manera, una señal de salida de 1 V del generador se convirtió en 12 V mediante el transformador. Con esta amplificación, se obtuvo una señal de voltaje dentro del rango planeado. Para que la señal oscilara entre valores negativos, fue necesario aplicar un *offset*, desplazando así la señal desde el cero de la función. Esto se logró conectando una fuente en serie con la salida del transformador, con la terminal positiva de la fuente conectada a tierra.

En la simulación del circuito corrida con el software *Multisim*, presentado en la Figura 7.1, se observó una señal con una amplitud de 60 V pico-pico y un *offset* de -30 V, lo que confirmó que el diseño cumplió con los requerimientos establecidos.

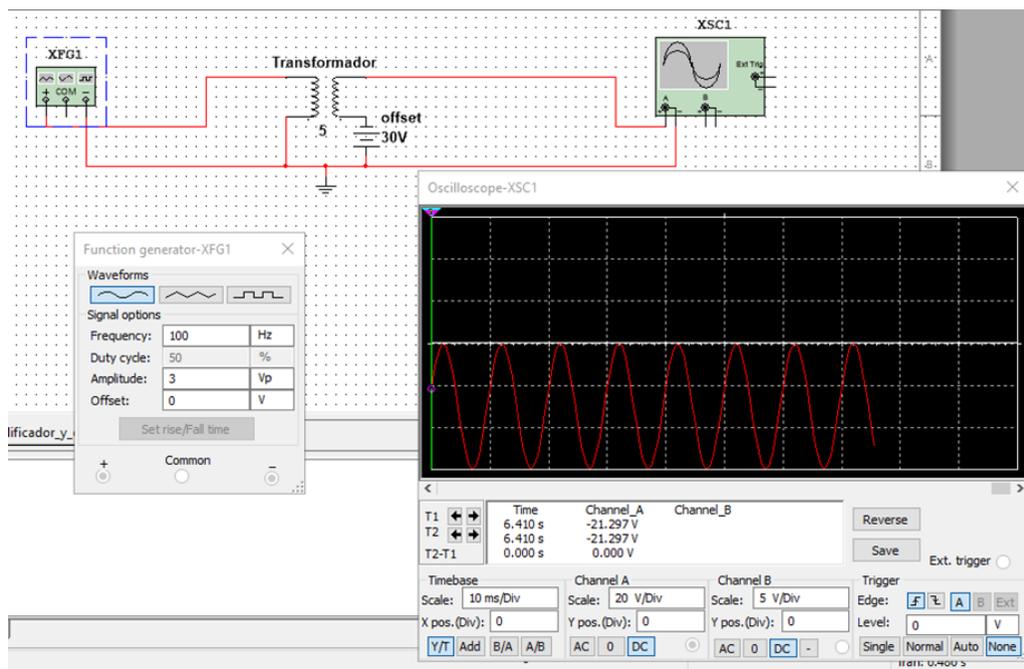


Figura 7.1: Esquema del circuito para la generación del pulso en el electrodo. Fuente: elaboración propia.

Para generar una onda cuadrada, se partió del circuito previamente explicado. A la salida del transformador, se conectó un circuito recortador, compuesto por dos diodos y dos fuentes. Este circuito recortador se diseñó para eliminar cada semiciclo de la señal, dependiendo de cómo se conecten los diodos: uno recorta el semiciclo positivo y el otro recorta el semiciclo negativo. El recorte se realizó cerca de la tensión de umbral de los diodos, aproximadamente 0,7 V, lo cual es insuficiente para alcanzar la amplitud deseada. Para establecer el límite de recorte adecuado, se conectaron fuentes en serie con los diodos. Esta configuración permitió ajustar la amplitud de la onda cuadrada a 60 V pico-pico con un *offset* de -30 V.

Este enfoque transformó la señal sinusoidal amplificada en una señal cuadrada con las características de amplitud y *offset* requeridas para la investigación, como se muestra en la Figura 7.2. La señal cuadrada se buscaba básicamente debido a que la afectación del pulso en los voltajes pico

fuera constante durante unos milisegundos, con el fin de establecer un efecto con un parámetro fijo en el flujo de partículas. El material utilizado fue una punta de tungsteno (usada por razones de durabilidad) y la geometría es idéntica a la de las puntas de la sonda de Langmuir, que consisten en una punta cilíndrica de aproximadamente 1,00 mm de diámetro y 3,75 mm de largo.

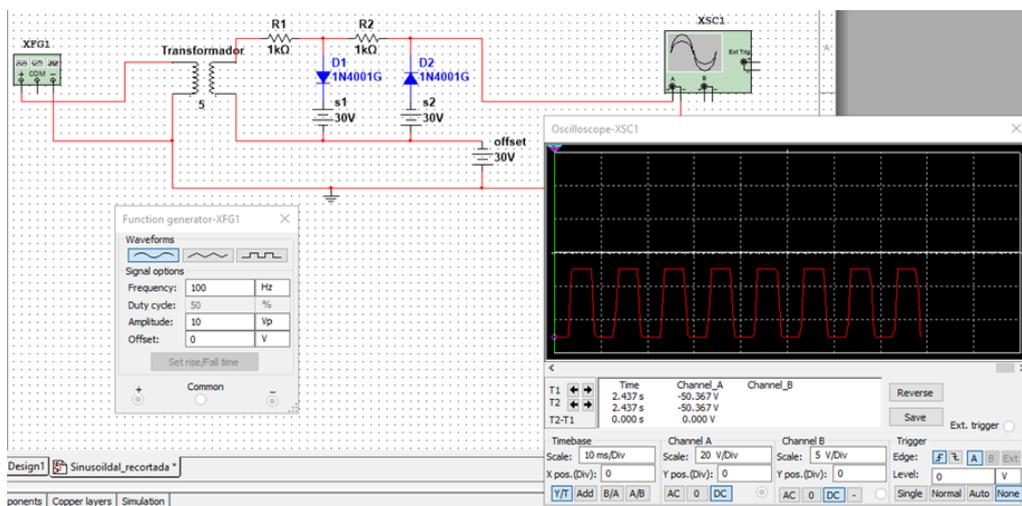


Figura 7.2: Simulación de pulso de onda cuadrada para el electrodo. Fuente: elaboración propia.

7.2. Mediciones con sonda de Langmuir

El arreglo experimental de la sonda de Langmuir colocado en el stellarator SCR-1 en el Laboratorio de Plasmas para Energía de Fusión y Aplicaciones se muestra en la Figura 7.3. Las salidas de las puntas de la sonda de Langmuir se conectaron al circuito del electrodo y las puntas de recolección de datos, de tal forma que una de las puntas funcionó como electrodo, mientras que otra realizó la recolección de los datos. La alimentación y las frecuencias necesarias del circuito del electrodo se obtuvieron a partir de las fuentes y el generador de frecuencias mostrados.

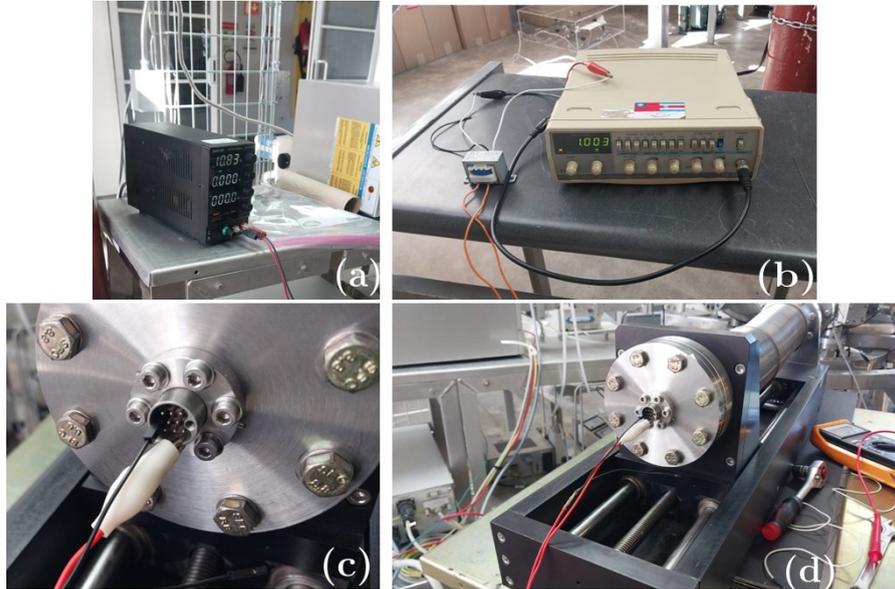


Figura 7.3: (a) Fuente de alimentación del electrodo (b) Generador de funciones y transformador (c) Distribución de terminales en el brazo de la sonda de Langmuir (d) Entrada del circuito del electrodo a la sonda. Fuente: elaboración propia.

Se obtuvieron las curvas de corriente-voltaje en el rango necesario para la medición de la corriente iónica de saturación y el voltaje flotante mediante la sonda simple de Langmuir. Se empleó un módulo *PXIe* de *National Instruments* (modelo NI_PXIE-8135) de treinta y dos entradas y salidas digitales (Asenjo et al., 2018) conectado a una de las puntas de la sonda, junto con una fuente de alimentación externa y un motor que permitió desplazar la punta de la sonda. Además, se utilizó un módulo de adquisición en tiempo real, así como contadores y temporizadores necesarios para operar bajo una modulación por ancho de banda y un convertor analógico/digital. En cuanto al software, la adquisición de datos se hizo mediante el código computacional desarrollado en el trabajo de Ortiz Jarquin (2019). Todas las mediciones se hicieron con una frecuencia de muestreo de 1500 datos/s, para un voltaje de barrido de las curvas VI de -80 V a 10 V .

Las posiciones de la medición (posiciones calculadas según la posibilidades del brazo mecánico) donde se colocó la punta de la sonda de Langmuir para la obtención de la corriente eléctrica proveniente del plasma se visualizan en la Figura 7.4 con el símbolo “x”. Las marcas “x” se ubicaron en un ángulo poloidal de -16° y un ángulo toroidal de 0° . Además, la posición radial de la punta de la sonda donde se realizaron las mediciones se estableció en tres lugares distintos: $0,2900\text{ m}$, $0,3070\text{ m}$ y $0,3150\text{ m}$. La posición vertical se mantuvo constante en $-0,0125\text{ m}$. Las superficies de flujo magnético se determinaron a partir de los cálculos realizados con el trazador de líneas de campo magnético BS-SOLCTRA (Jiménez et al., 2019).

Mediante un *jupyter notebook* se procesaron los valores de corriente y voltaje de las curvas IV muestreadas para cada una de las descargas por medio de la sonda Langmuir. Los cálculos mostrados aquí se realizaron con el archivo *CálculosTurbulencias.ipynb*, PlasmaTEC-ITCR en *GitLab* PlasmaTEC-ITCR (2023). Con este cuaderno interactivo se importaron las bibliotecas y archivos externos necesarios para los cálculos, se establecieron los parámetros iniciales y se realizaron los

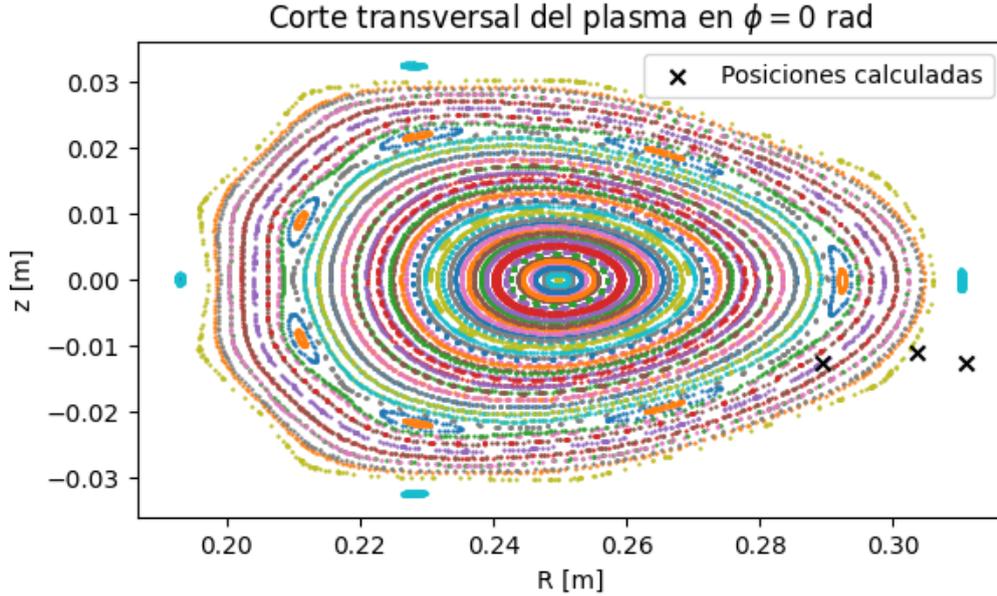


Figura 7.4: Superficies de flujo magnético para la posición toroidal a 0° y los puntos de medición seleccionados. Fuente: elaboración propia.

cálculos correspondientes a las turbulencias en el plasma. En este cuaderno, se definió la función *VariablesTurbulencias* con base en un conjunto de datos (archivo .xlsx de cada descarga) y las variables iniciales que son el rango de voltaje de barrido, frecuencia de muestreo y la magnitud de campo magnético en el punto de medición. Primeramente, se llamó a la función *PreProcesado2* del archivo *fileio.py*, donde, se renombraron las columnas del *DataFrame* utilizando *df.rename* para que las dos primeras columnas se llamaran “Voltaje” y “Corriente”. Luego, se eliminó el primer valor de cada columna con *df[Voltaje].pop(0)* y *df[Corriente].pop(0)* porque sucedió que el primer valor no se registró correctamente como número y esto podría causar errores en el código. Este valor inicial no fue importante ya que al principio, por lo general se midió ruido. Después, se calcularon las diferencias entre filas consecutivas para las columnas “Voltaje” y “Corriente” usando *df["Voltaje"].diff()* y *df["Corriente"].diff()*, y los resultados se almacenaron en nuevas columnas llamadas “Diferencia VOLT” y “Diferencia CORR”, respectivamente. Se creó una lista llamada “diferencias_mayores” para almacenar los índices de las filas donde la diferencia en voltaje superaba un cuarto del rango de la señal de diente de sierra, que se definió como

$$(V_{max} - V_{min}) \cdot 0.25 \quad (7.1)$$

Para identificar estas diferencias significativas, se iteró sobre el *DataFrame* con un bucle *for* y se añadieron los índices correspondientes a la lista *diferencias_mayores* cuando se cumplía esta condición. Finalmente, se reordenaron las columnas del *DataFrame* para incluir “Tiempo”, “Voltaje”, “Corriente”, “Diferencia VOLT” y “Diferencia CORR”. Luego se filtró el ruido de las mediciones, además se aisló los barridos de datos de cada curva de cada descarga de plasma. Luego, del archivo *calc.py* se llamó a la función *Calc_turbulencias*, la que que permitió obtener los valores de la corriente de saturación I_{sat} , a partir de un modelo de regresión de aprendizaje automático, y el voltaje flotante V_f , con el punto de voltaje más cercano para el que la corriente de la curva IV es nulo. Esto se ajustó a lo expuesto en la sección 6.1, para cada uno de los segmentos de la descarga,

obteniendo una lista de valores para cada una de estas variables.

Estas listas fueron posteriormente depuradas a partir de la función *Depurar*, adaptada para el uso de la Prueba de Grubbs. Esta prueba estadística es empleada para la detección de valores atípicos, con un nivel de significancia de $\alpha = 0,01$. Para los cálculos de los parámetros necesarios para las mediciones de turbulencias, se requirió del cálculo de variables tilde para I_{sat} y V_f , para lo cual la función *tilde*, incluida en el código, fue empleada. Con estos valores tilde y tomando en cuenta lo mostrado en la sección 6.1, se estimaron los parámetros $\tilde{E}\theta$, v_r^{eff} , v_θ^{ph} y Γ_r . Finalmente, la función *VariablesTurbulencias* calculó un array de tiempo asociado a cada una de las descargas realizadas, utilizados en el proceso de graficar las variables anteriores respecto al tiempo.

7.3. Convertidor Buck DC-DC para el SCR-1

El sistema se diseñó para recibir su fuente de alimentación principal de la red eléctrica, que luego llega a un transformador trifásico. Este transformador proporcionará la potencia necesaria para el SCR-1, pero solo después de pasar por la etapa de conversión AC/DC. Una vez rectificada, el proceso de conversión DC-DC ajusta los valores para satisfacer los requisitos del sistema. La figura 7.5 ilustra el diagrama de diseño básico que ejemplifica las etapas clave.

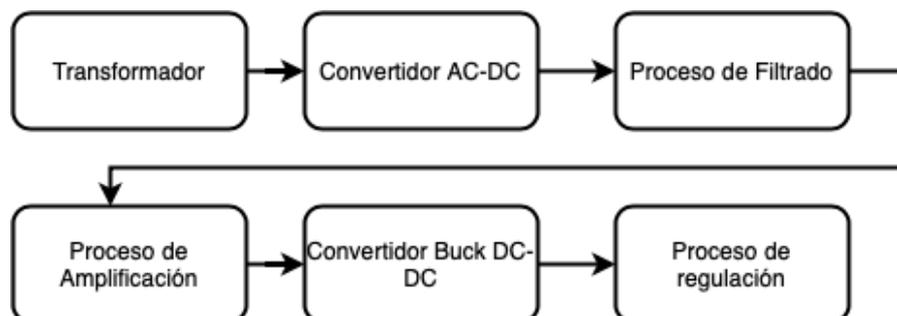


Figura 7.5: Diagrama de diseño del sistema de alimentación del SCR-1. Fuente: Fu et al. (2010)

De acuerdo con Vargas et al. (2015), el sistema de bobinas del SCR-1 consta de 12 unidades modulares, que en conjunto alcanzan una corriente total de 4,350 kA, generando un campo magnético promedio de 41,9 mT. Cada bobina se construyó utilizando 6 vueltas de cable AWG #4, con una corriente de 725 A por vuelta, lo que suma la corriente total requerida. Las bobinas conectadas en serie tienen una resistencia medida de $0,08 \Omega$ y una inductancia de $3,9 \mu\text{H}$, datos esenciales para el diseño del convertidor Buck. Es importante destacar que la variación de temperatura de las bobinas, en un rango de 20°C a 70°C después de 8 s de operación, se tiene en cuenta para garantizar la estabilidad del sistema, aunque su impacto en la resistencia es despreciable, según afirmó Mora et al. (2017).

7.4. Rectificador de Corriente y Filtrado

Para el diseño, se empezó con la etapa de rectificación de la señal con el convertidor AC-DC utilizando diodos de potencia y capacitores del tipo industrial debido a la elevada magnitud de corriente que requiere el stellarator para su funcionamiento. El circuito propuesto se observa en la figura 7.6.

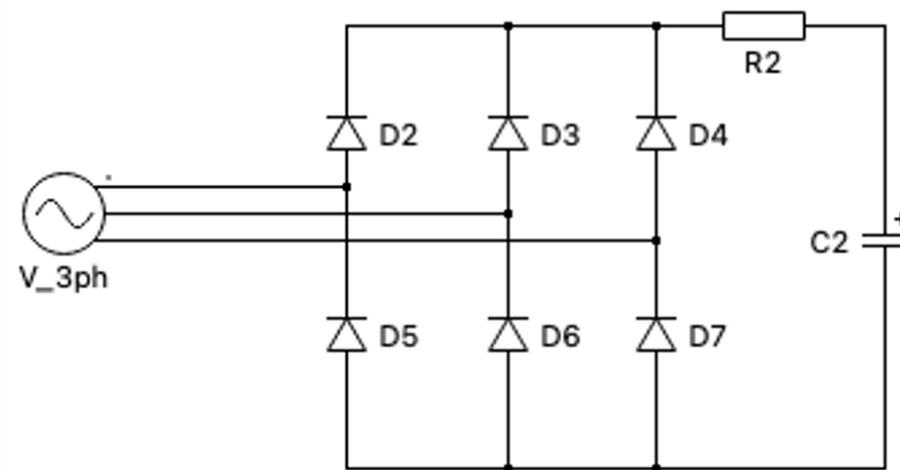


Figura 7.6: Circuito rectificador de corriente propuesto. Fuente: elaboración propia.

Para la simulación del circuito, se utilizó el programa *PLECS* debido a que es una herramienta valiosa para ingenieros que diseñan y simulan sistemas de potencia debido a su rapidez, integración con Simulink, amplia biblioteca de componentes, capacidades de modelado térmico y facilidad de uso. El capacitor de filtro se eligió considerando la tensión y corriente que debe soportar y la disponibilidad de componentes en el mercado, sin omitir el hecho de que el rizado del rectificador debe ser mínimo y para la aplicación se considera apropiado un 3%. Tomando en cuenta lo mencionado anteriormente sobre la elevada magnitud de la corriente en el SCR-1, así como una tensión de 120 V RMS provenientes del transformador trifásico, se eligieron los siguientes componentes electrónicos comerciales para la implementación del circuito eléctrico:

- Capacitor: MAL250034153E3 del fabricante CVishay Beyschlag/Draloric/BC Components. Este es un capacitor electrolítico de aluminio con terminal roscado con capacitancia de 15 000 μF y un régimen de voltaje de 420 VDC. Se deben utilizar 12 capacitores en paralelo para conseguir la capacitancia de 180 000 μF .
- Diodos rectificadores: VS-SD400C04C del fabricante Vishay Semiconductors. Este es un diodo rectificador con una capacidad para corriente directa de 800 A, una tensión inversa de 400 V y una tensión directa de 1,86 V.

Cabe mencionar el hecho de que la utilización de la resistencia mostrada como R2 en el circuito de la Figura 7.6 se debe a la necesidad de evitar un error numérico en el arranque de la simulación y no tiene valor alguno una vez que se implemente el circuito.

7.5. Convertidor Buck DC-DC

Para mantener la corriente constante en el SCR-1, se optó por la configuración del convertidor Buck. La tensión requerida se calcula en 58 V, considerando las especificaciones propias del SCR-1. Cabe mencionar que el convertidor Buck se dimensionó con un margen de seguridad debido a la naturaleza experimental del equipo. El diagrama del circuito propuesto se muestra en la Figura 7.7.

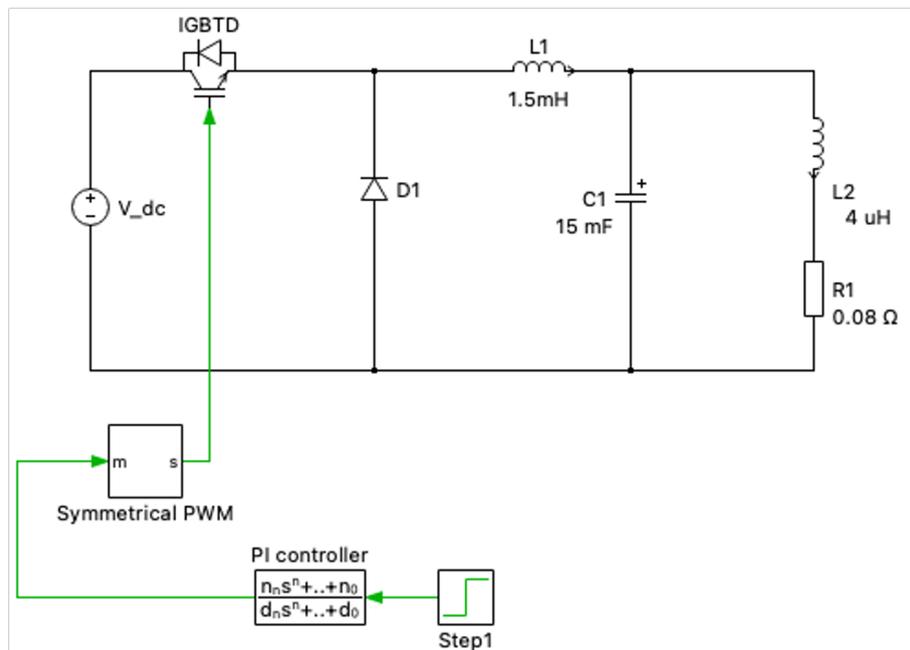


Figura 7.7: Circuito convertidor de buck propuesto. Fuente: elaboración propia.

El PWM requerido para el control del IGBT, mostrado en la Figura 7.7 como $IGBT_D$, se simuló con un generador de frecuencia mostrado como $SymmetricalPWM$ en la misma Figura. Los componentes $R1$ y $L2$ corresponden a los valores conocidos para las bobinas del SCR-1. El resto de los componentes se dimensionaron de acuerdo con las ecuaciones mostradas en el marco teórico para un convertidor Buck (sección 6) y considerando la disponibilidad de componentes en el mercado.

- Cálculo del ciclo de trabajo (D): se calcula a partir de la ecuación (6.6) tomando $V_I = 293$ V de la salida del circuito rectificador y $V_O = 58$ V.

$$D = \frac{58}{293} = 0,20 \quad (7.2)$$

- Elección del inductor ($L1$): la bobina se elige de acuerdo con la disponibilidad del mercado sin perder de vista su papel en garantizar que el convertidor se mantenga siempre en su modo de conducción continua Mohan et al. (2003). Eligiendo una inductancia de 1,5 mH se calcula la corriente de rizado para validar que se encuentre dentro de un rango seguro y aceptable

para la operación del stellarator. Considerando los valores ya conocidos de V_O , V_I y D y estimando una frecuencia de conmutación f de 2 kHz se calcula la frecuencia de conmutación a partir de la ecuación (6.9).

$$\Delta I_L = \frac{(293 - 58) \cdot 0,2}{0,0015 \cdot 2000} = 15,67 \text{ A} \quad (7.3)$$

La corriente de rizado obtenida corresponde aproximadamente a un 2 % de la corriente del circuito, por lo que se consideró aceptable para la aplicación. Cabe mencionar que el valor de la frecuencia se determinó en 2 kHz al tener que ser una frecuencia baja para disminuir las pérdidas por conmutación; sin embargo, la frecuencia estuvo ligada con los valores de la capacitancia e inductancia del filtro por lo que no se pudo elegir una frecuencia muy baja ya que esto provocaría valores elevados en los componentes electrónicos que a su vez dificultaría la elección de una oferta comercial.

- Elección del Capacitor de Salida $C1$: con el fin de proveer un grado de estandarización al diseño, se decidió utilizar el mismo capacitor utilizado en el circuito rectificador de corriente y se verifica el voltaje de rizado obtenido en la salida a partir de la ecuación (6.10).

$$\Delta V_O = \frac{15.7}{(8 \cdot 2000 \cdot 0.015)} = 65,4 \text{ mV} \quad (7.4)$$

Finalmente, se eligieron los siguientes componentes electrónicos comerciales para la implementación del circuito:

- Fuente de alimentación de 293 V (V_{dc}): corresponde a la salida del circuito rectificador de corriente.
- IGBT ($IGBT_D$): FZ1200R17HE4PHPSA1 del fabricante Infineon Technologies el cual tiene un voltaje emisor-colector máximo de 1700 V y una corriente continua en el colector de 1200 A.
- Diodo ($D1$): VS-SD400C04C del fabricante Vishay Semiconductors. Este es un diodo rectificador con una capacidad para corriente directa de 800 A, una tensión inversa de 400 V y una tensión directa de 1,86 V.
- Capacitor ($C1$): MAL250034153E3 del fabricante Vishay Beyschlag/Draloric/BC Components. Este es el mismo modelo de capacitor utilizado en el circuito rectificador de corriente.
- Inductor ($L1$): DB2-154 del fabricante Gowanda Electronics. Este inductor puede manejar corrientes de 960 A y tiene una inductancia de 1,5 mH.

7.6. Control por medio de PWM

Para diseñar un sistema de control que asegure que el PWM entregue 58 V de salida en el convertidor Buck independientemente de la variación que pueda presentar la carga, se consideró la implementación de un controlador de retroalimentación basado en un controlador PI (Proporcional-Integral) en combinación con el controlador PWM comercial SG3525, fabricado por Texas Instruments.

Para llevar a cabo esta regulación, se decide utilizar un controlador de corriente debido a que esta es la variable de interés para el funcionamiento correcto y seguro de las bobinas del stellarator. Cambios pequeños en la resistencia de la bobina durante la operación, ocasionan cambios significativos en la corriente que transita por las bobinas y esto podría afectar el campo electromagnético y comprometer la estabilidad del plasma.

En el convertidor Buck, el controlador PI ajusta el ciclo de trabajo del PWM para mantener una corriente de salida constante. Si la corriente de salida disminuye por debajo de la referencia 725 A, el error positivo hace que el controlador aumente el ciclo de trabajo del PWM, incrementando la corriente de salida. Si la corriente de salida excede la referencia, el error negativo reduce el ciclo de trabajo del PWM, disminuyendo la corriente de salida. Este mecanismo asegura que la corriente de salida se mantenga estable y en el nivel deseado, independientemente de las fluctuaciones en la carga o en la entrada del sistema.

La función de transferencia para el circuito convertidor Buck se muestra en la ecuación (7.5):

$$\frac{I_L(s)}{DV_{dc}(s)} = \frac{1}{L_1 L_2 C_1 s^3 + L_2 R_1 C_1 s^2 + (L_1 + L_2) s + R_1} \quad (7.5)$$

Para el diseño del controlador se ingresó la función de transferencia dentro del software de simulación *MatLab* y el resultado obtenido se colocó nuevamente en el simulador de potencia *PLECS* para validar su funcionamiento.

Finalmente, para conseguir la medición de la corriente de salida el circuito Buck, se propone el uso de un sensor Hall HAT 800-S del fabricante LEM USA Inc debido a su capacidad de medir corrientes de hasta 800 A con una salida de voltaje analógica de ± 4 V.

En la Figura 7.8 se muestra un diagrama de un gráfico funcional de etapas (GRAF CET) para el sistema de control PWM.

Para el diagrama se tienen los siguientes estados:

- E0: Sistema inactivo. El sistema se encuentra en reposo y en espera de ser activado.
- E1: Inicialización del Sistema: El sistema inicializa los componentes y se prepara para medir la corriente en las bobinas del stellarator.
- E2: Medición de Corriente de Salida. La corriente de salida que se mide se envía a la etapa de comparación.
- E3: Comparación con la Corriente de Referencia: La corriente medida se compara con la corriente de referencia.
- E4: Ajuste del PWM. Si la corriente de salida no coincide con la de referencia, se ajusta el ciclo de trabajo del PWM.
- E5: Verificación y Retroalimentación. Se verifica si la salida es la esperada y se proporciona retroalimentación para ajustar el sistema si es necesario.

También se cuenta con las siguientes transiciones:

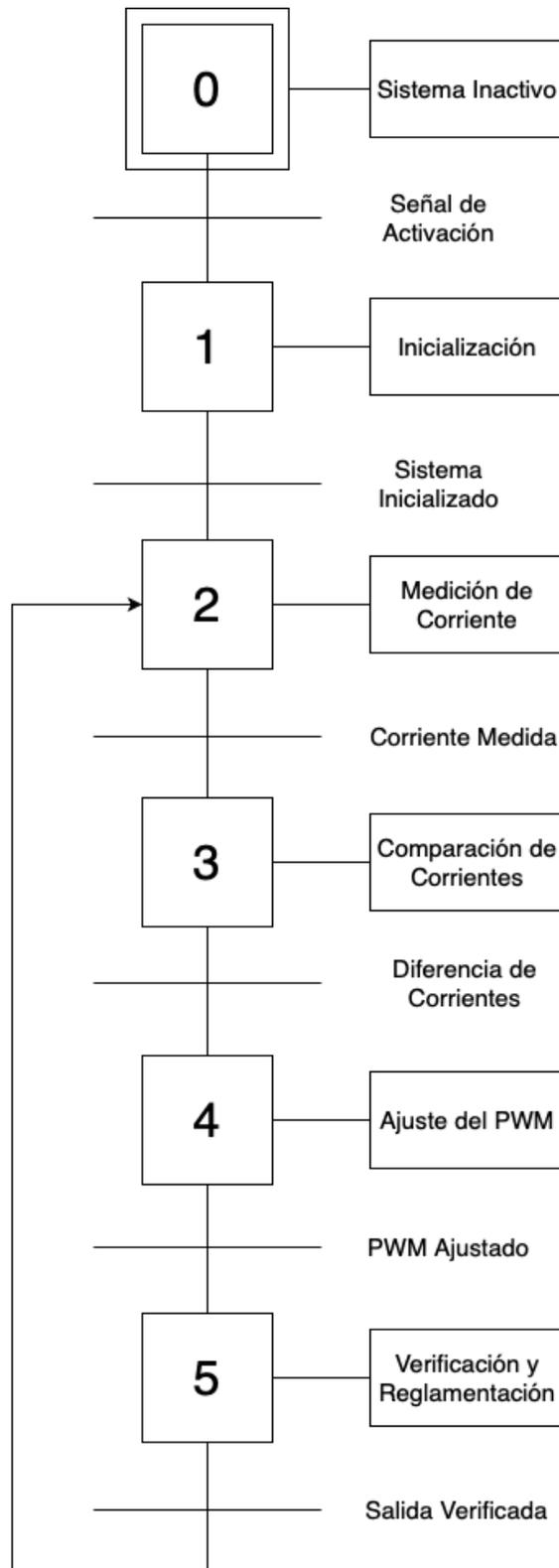


Figura 7.8: Diagrama GRAFCET de control propuesto para el SCR-1. Fuente: elaboración propia.

- T0: Activar el Sistema. Cuando se recibe la señal de activación, el sistema se mueve a la inicialización.
- T1: Sistema Inicializado. Una vez inicializado, el sistema pasa a medir la corriente de salida.
- T2: Corriente Medida. La medición de la corriente de salida está completa y se envía para la comparación.
- T3: Comparación Finalizada. La comparación se ha realizado y se determina si es necesario ajustar el PWM.
- T4: PWM Ajustado. El ajuste del PWM está completo y se pasa a la verificación de la salida.
- T5: Salida Verificada. La salida se ha verificado y, si es correcta, el sistema vuelve a medir la corriente de salida para mantener el control continuo.

7.7. Propagación de ondas a través de la cámara de vacío del SCR-1

El ambiente de simulación para el diseño de la antena fue *COMSOL Multiphysics*. En este software se establecieron los siguientes parámetros importantes:

- Modo de propagación de las ondas.
- Diámetro de la antena: debe ser lo suficientemente pequeño para que la antena entre en el puerto, pero lo bastante cercano al diámetro del puerto para considerarlo como un solo ente en las simulaciones.
- Longitud de la antena en el interior de la cámara del stellarator: debe ser tal que la antena no entre en contacto con el plasma dentro de la cámara.
- Corte de la antena Vlasov.

El magnetrón modelo Alter TMA2050 brinda la energía necesaria para el proceso de descarga de plasma del SCR-1. Este equipo opera a una potencia de 2000 W y emite radiación a una frecuencia de 2,45 GHz. Se seleccionó el modo TE debido a que en las consideraciones en el diseño del sistema de calentamiento ECRH, se optó por la propagación de ondas electromagnéticas en el modo ordinario, según lo explicado en Trimiño (2011). Por lo tanto, se utilizó el modo TE_{10} .

Para la simulación, se utilizó el puerto ubicado en el ángulo de 330° en dirección toroidal de la cámara del SCR-1, como se muestra en la Figura 7.9. Además, se determinó el espacio que ocupaba la antena dentro de la cámara superponiendo las superficies de flujo magnético del plasma a partir de la Figura 7.12. Esta metodología permitió medir las distancias marcadas en la Figura 7.11.

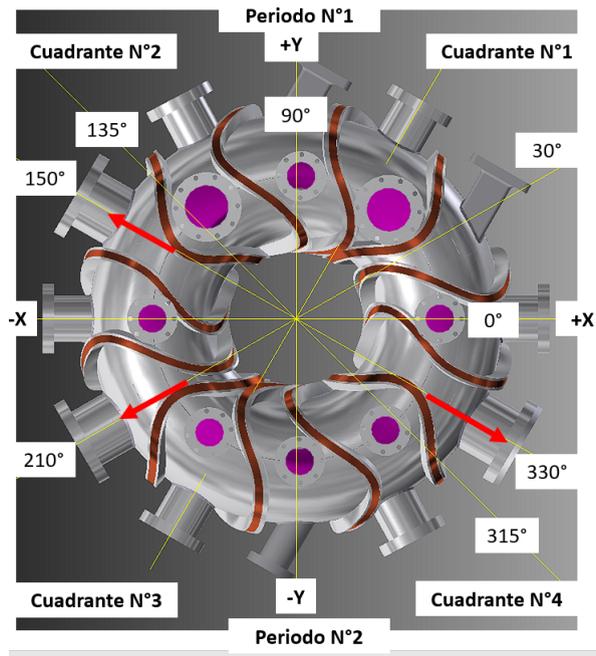


Figura 7.9: Vista superior de la cámara del Stellarator con puertos. Fuente: elaboración propia.

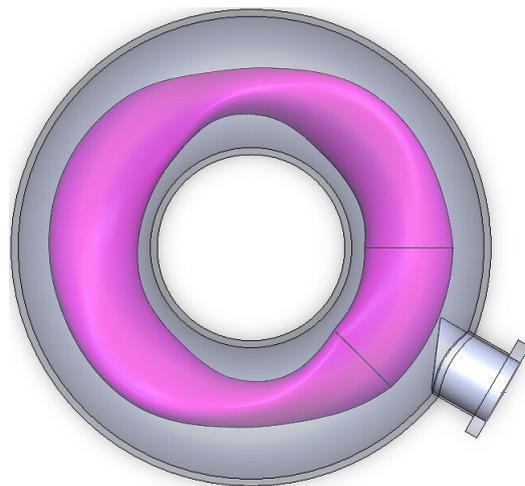


Figura 7.10: Vista superior de la cámara del Stellarator con el plasma superpuesto. Fuente: elaboración propia.

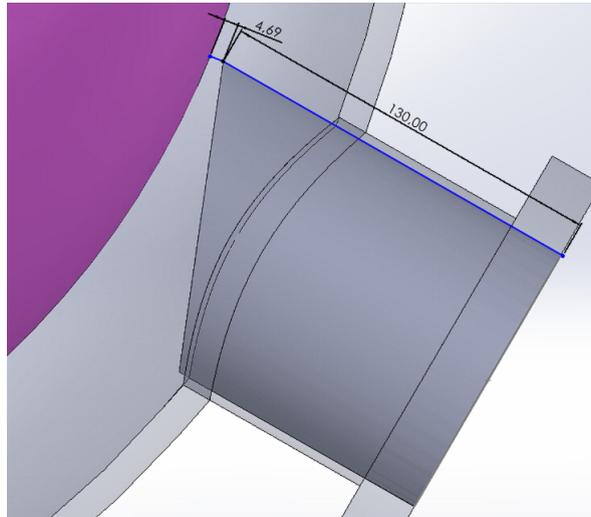


Figura 7.11: Distancia en milímetros de la antena sin tocar el plasma. Fuente: elaboración propia.

En el diseño de las dimensiones de la antena, se tomó como referencia el diámetro del puerto del SCR-1 en el puerto seleccionado, como se muestra en la Figura 7.12. La antena debe tener un diámetro menor que el del puerto para que pueda encajar adecuadamente. Una de las ventajas de

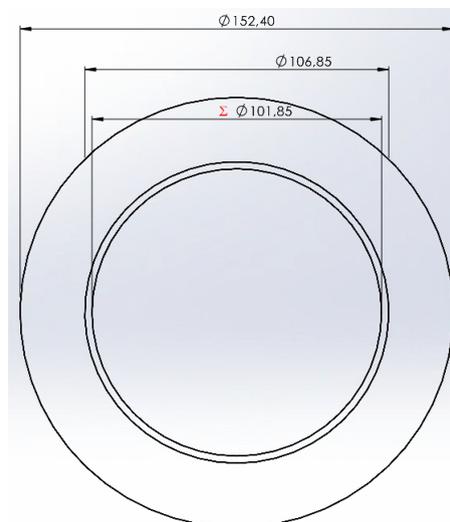


Figura 7.12: Vista trasera del puerto en 330° del SCR-1 en milímetros. Fuente: elaboración propia.

simular la propagación de ondas electromagnéticas con *COMSOL Multiphysics* fue su capacidad para parametrizar. Esta funcionalidad se utilizó para variar el ángulo de corte α de la antena Vlasov, como se muestra en la Figura 7.13. Para iniciar la simulación en *COMSOL Multiphysics*, los módulos utilizados incluyeron el acoplamiento de conductividad del plasma con el movimiento y colisión de partículas, así como la fuente de calor de electrones en las simulaciones definidas como multifísicas. En el caso específico del módulo del plasma, se empleó gas hidrógeno y se incorporaron las reacciones

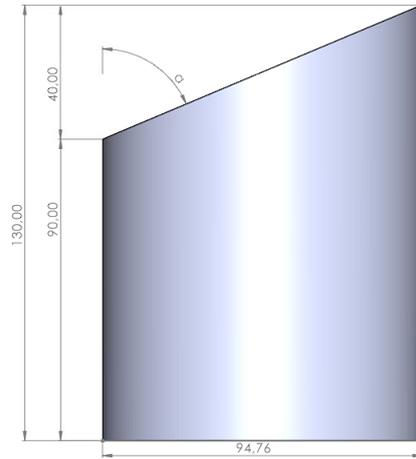


Figura 7.13: Diseño propuesto de la antena Vlasov en milímetros. Fuente: elaboración propia.

posibles, incluyendo los choques con las paredes del sistema. Respecto al dominio del tiempo, se hicieron 2 estudios en total: se usó el estudio en el dominio de frecuencias para la propagación de las ondas electromagnéticas provenientes del sistema de calentamiento y para el resto se definió el estudio estacionario, como se muestra en la Figura 7.15. Para abordar este último problema, se utilizó el solucionador estacionario, tal como recomienda el manual de *COMSOL*. Según el manual, este solucionador es adecuado para encontrar soluciones a problemas estacionarios lineales y no lineales y se emplea automáticamente al añadir un estudio de dominio estacionario o de frecuencia al modelo, lo que lo convierte en la opción predeterminada adecuada para esta situación (Figura 7.16).

Los parámetros físicos que se pueden modificar en *COMSOL Multiphysics* incluyeron las ondas electromagnéticas incidentes en el SCR-1 por el sistema de calentamiento, el sistema de contención mediante el campo magnético de las bobinas, el flujo del gas inyectado en el SCR-1 y la bomba de vacío, y finalmente el plasma generado, considerando el choque de las partículas y la absorción de energía. Estos parámetros fueron descritos respectivamente mediante las interfaces físicas de ondas electromagnéticas, campos magnéticos y eléctricos, flujo laminar y plasma. La multifísica vincula el plasma con el sistema de calentamiento mediante el acoplamiento de conductividad del plasma y la fuente de calor de electrones. Para la simulación, primero se implementaron individualmente los parámetros físicos del sistema de calentamiento, el flujo laminar y el sistema de contención del plasma, con el objetivo de verificar su correcto funcionamiento. Posteriormente, se unieron en una sola simulación, añadiendo el módulo de plasma.

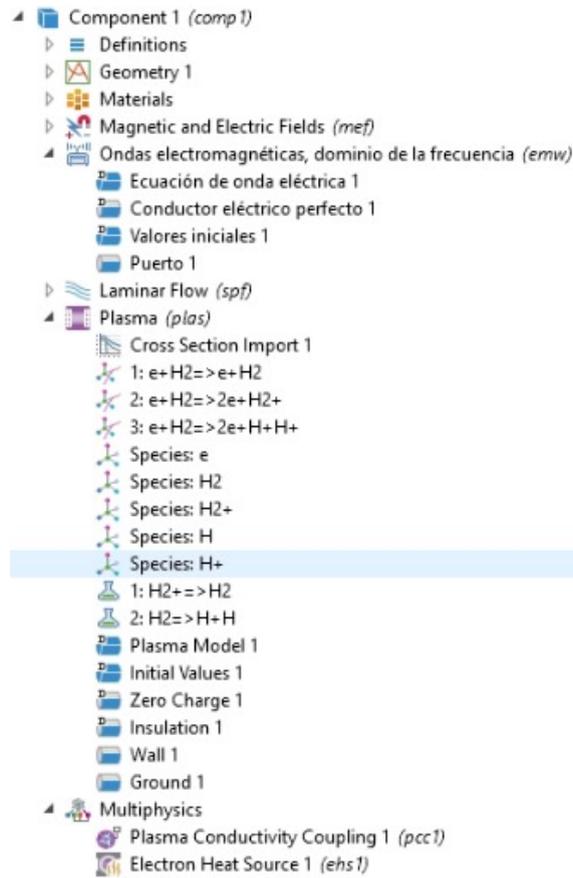


Figura 7.14: Captura de pantalla de los módulos de *COMSOL Multiphysics* utilizados en la propagación de ondas en el SCR-1. Fuente: elaboración propia

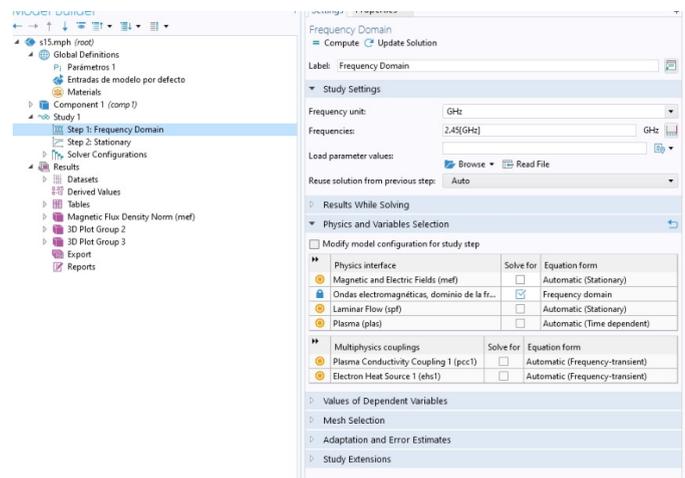


Figura 7.15: Captura de pantalla de la configuración del dominio del tiempo en *COMSOL Multiphysics*. Fuente: elaboración propia

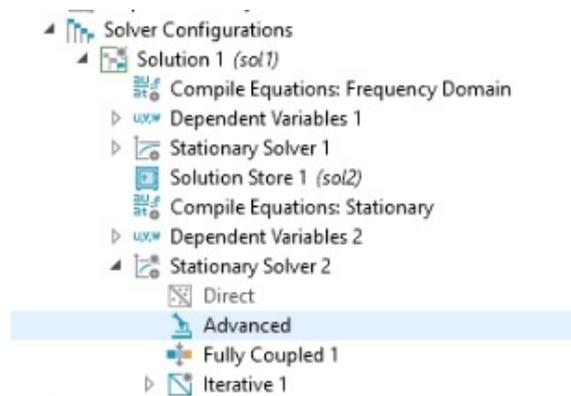


Figura 7.16: Captura de pantalla del solucionador estacionario en *COMSOL Multiphysics*. Fuente: elaboración propia

8. Resultados

8.1. Implementación del circuito del electrodo

Gracias a la simulación realizada con *MultiSIM*, como se mostró en la Figura 7.1, se diseñó el circuito eléctrico para alimentar una punta de la sonda de Langmuir. En la Figura 8.1 se presenta el circuito completo, que incluye las fuentes de alimentación, el transformador, la conexión a las terminales de las puntas de la sonda de Langmuir y la verificación de la señal en el osciloscopio. Esta última prueba se ilustra en la Figura 8.2, donde se puede observar que se logró exitosamente la implementación de un voltaje oscilante.

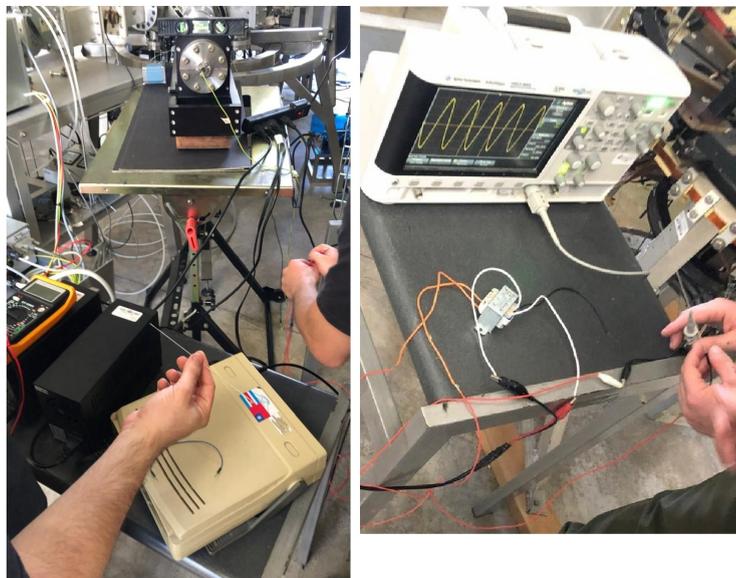


Figura 8.1: Circuito completo del electrodo. Fuente: elaboración propia

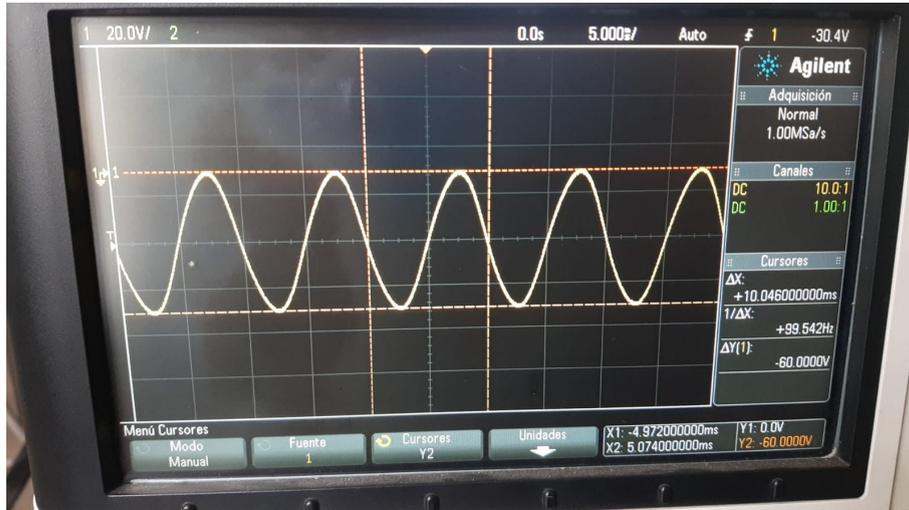


Figura 8.2: Salida del osciloscopio para el circuito eléctrico de alimentación del electrodo. Fuente: elaboración propia

8.2. Mediciones con sonda de Langmuir

El cálculo de campo magnético para las tres posiciones radiales seleccionadas se presenta en las Figuras 8.3, 8.4 y 8.5. Estas posiciones se suponen como puntos fuera de la última superficie cerrada de flujo y dentro de lo que se conoce como *Scrape off layer* (SOL).

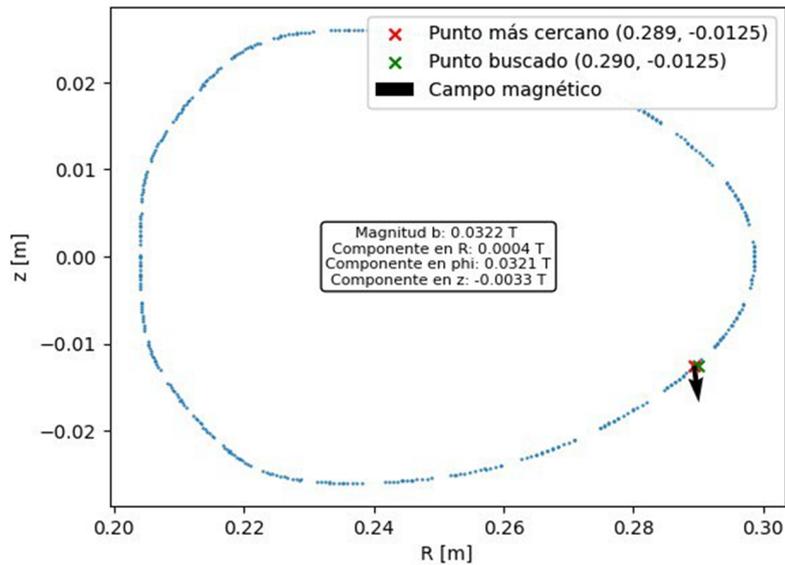


Figura 8.3: Magnitud del campo magnético helicoidal en el punto de medición $R = 0,2900\text{m}$. Fuente: elaboración propia.

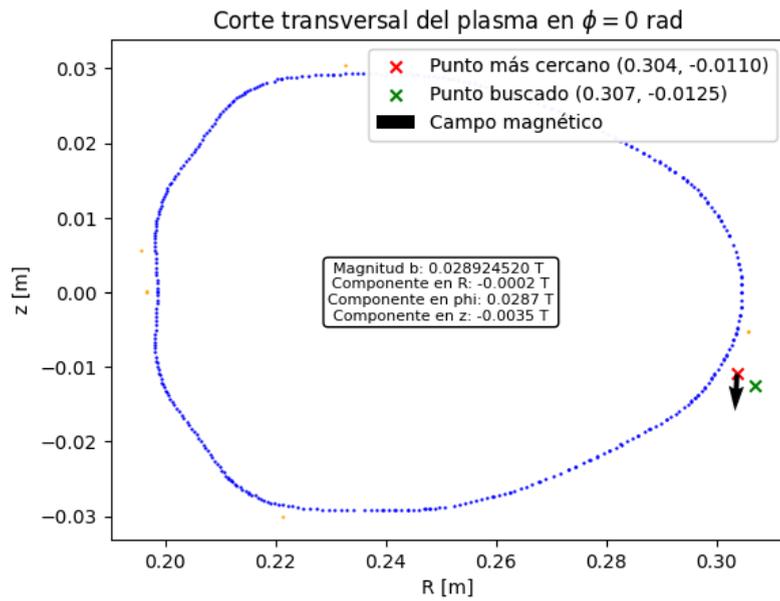


Figura 8.4: Magnitud del campo magnético helicoidal en el punto de medición $R = 0,3070$ m. Fuente: elaboración propia.

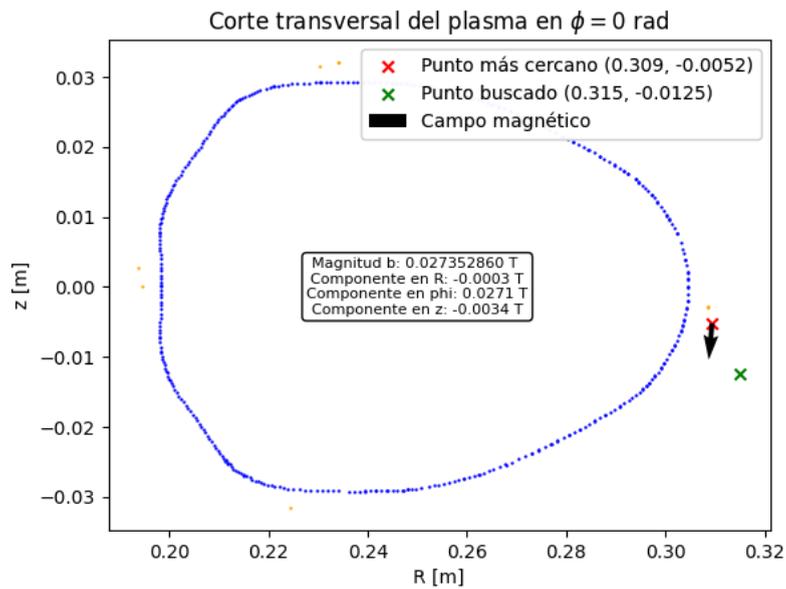


Figura 8.5: Magnitud del campo magnético helicoidal en el punto de medición $R = 0,3150$ m. Fuente: elaboración propia.

Las curvas IV para la posición $R = 0,3070$ m sin la polarización del electrodo se muestra en la Figura 8.6 y con la aplicación de una señal sinusoidal para el electrodo de -60 V y -120 V se muestran en las Figuras 8.7 y 8.8. Se presentan los resultados únicamente esta posición radial, ya que la tendencia respecto a las demás posiciones se mantuvo similar y no hubo otros aspectos relevantes que discutir.

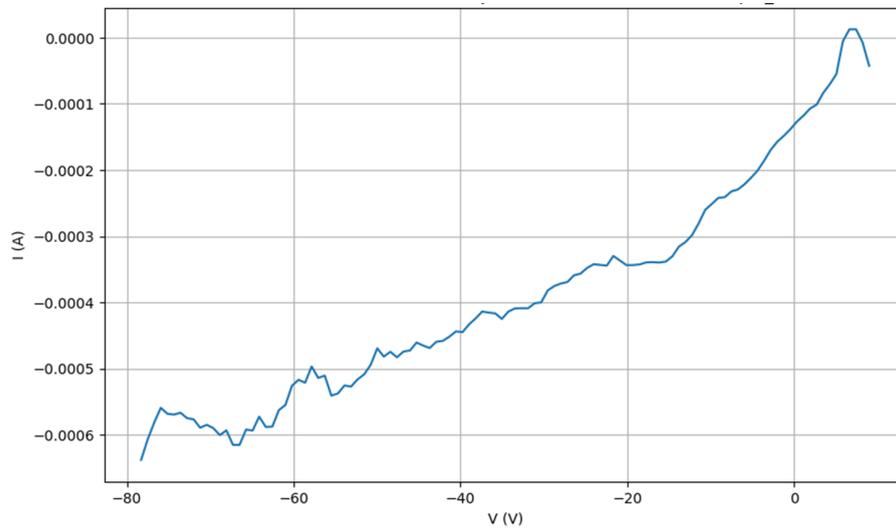


Figura 8.6: Curva de corriente y voltaje para el punto de medición $R = 0,3070$ m cuando no se aplica un voltaje en el electrodo. Fuente: elaboración propia.

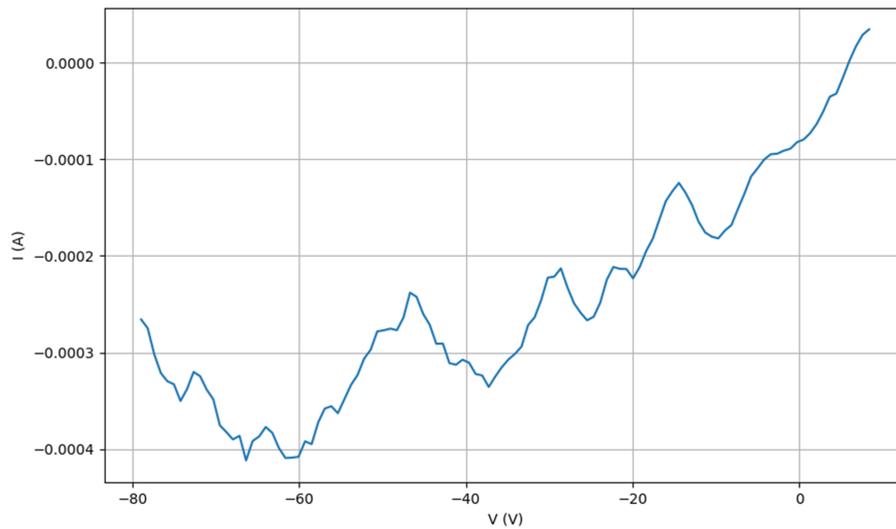


Figura 8.7: Curva de corriente y voltaje para el punto de medición $R = 0,3070$ m cuando se aplica un voltaje en el electrodo de -60 V. Fuente: elaboración propia.

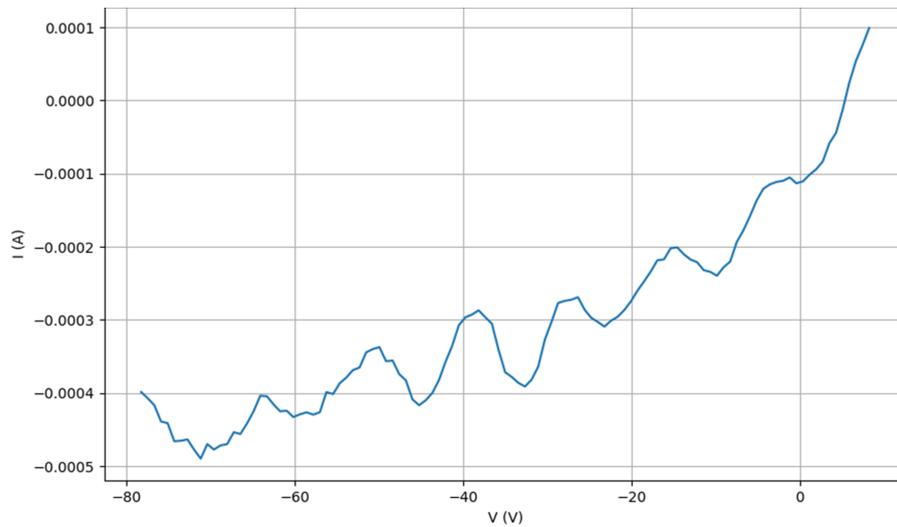


Figura 8.8: Curva de corriente y voltaje para el punto de medición $R = 0,3070$ m cuando se aplica un voltaje en el electrodo de -120 V. Fuente: elaboración propia.

Las Figuras 8.9 a 8.12 muestran la evolución del potencial flotante y la corriente de saturación iónica en función del tiempo, a partir de lo explicado en la sección 6.2, bajo dos condiciones distintas: con y sin la aplicación de un potencial externo en el electrodo.

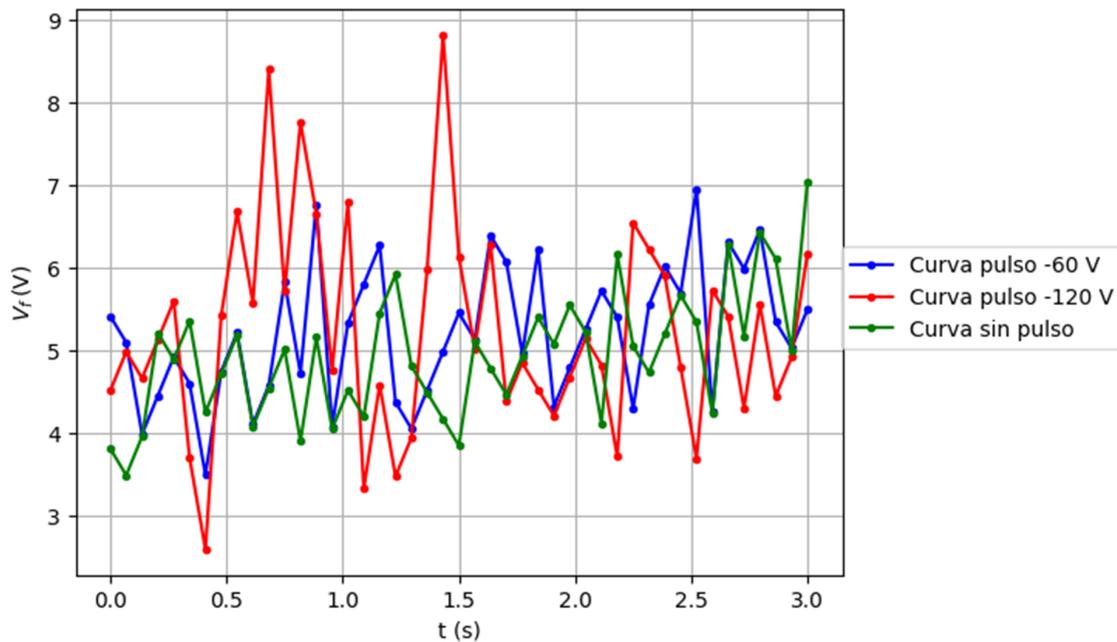


Figura 8.9: Potencial flotante en función del tiempo para el punto de medición $R = 0,2900$ m. Fuente: elaboración propia.

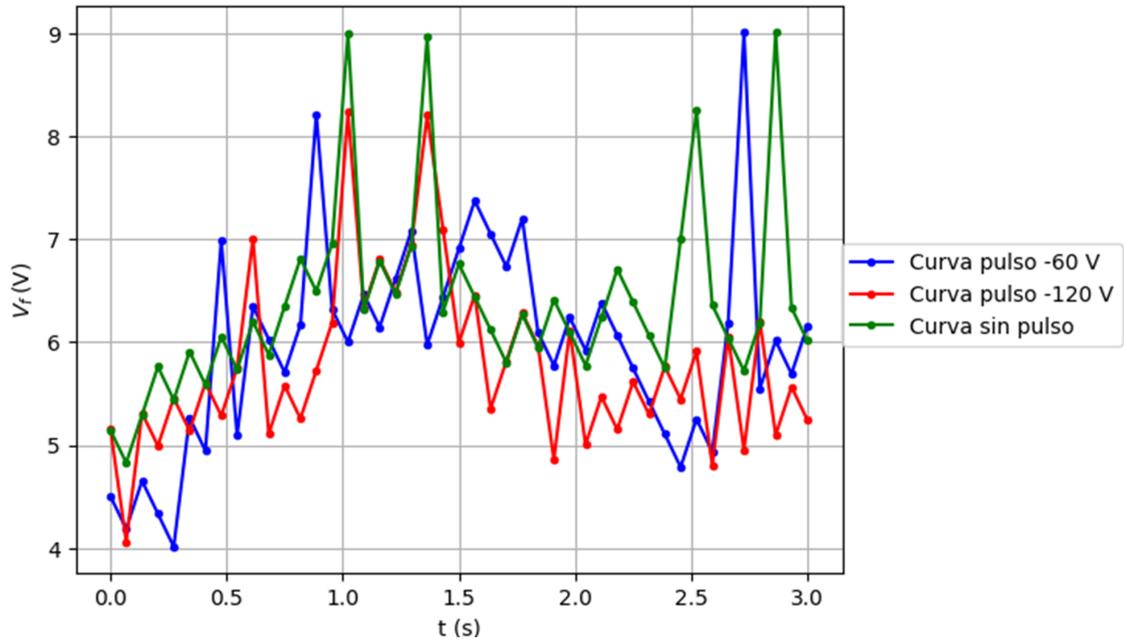


Figura 8.10: Potencial flotante en función del tiempo para el punto de medición $R = 0,3070$ m. Fuente: elaboración propia.

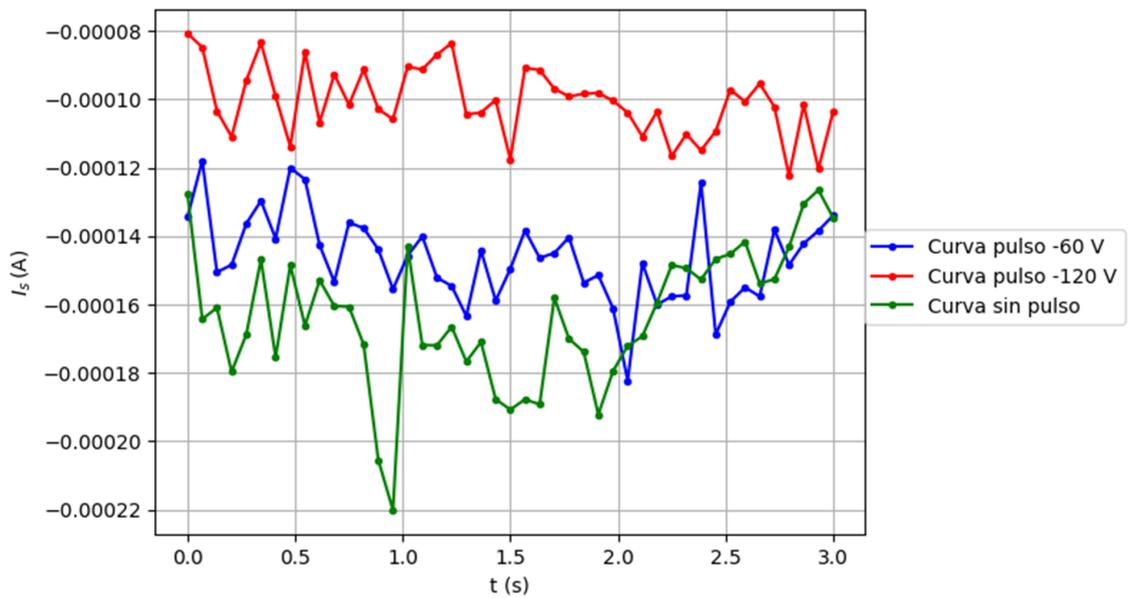


Figura 8.11: Corriente de saturación iónica en función del tiempo para el punto de medición $R = 0,2900$ m. Fuente: elaboración propia.

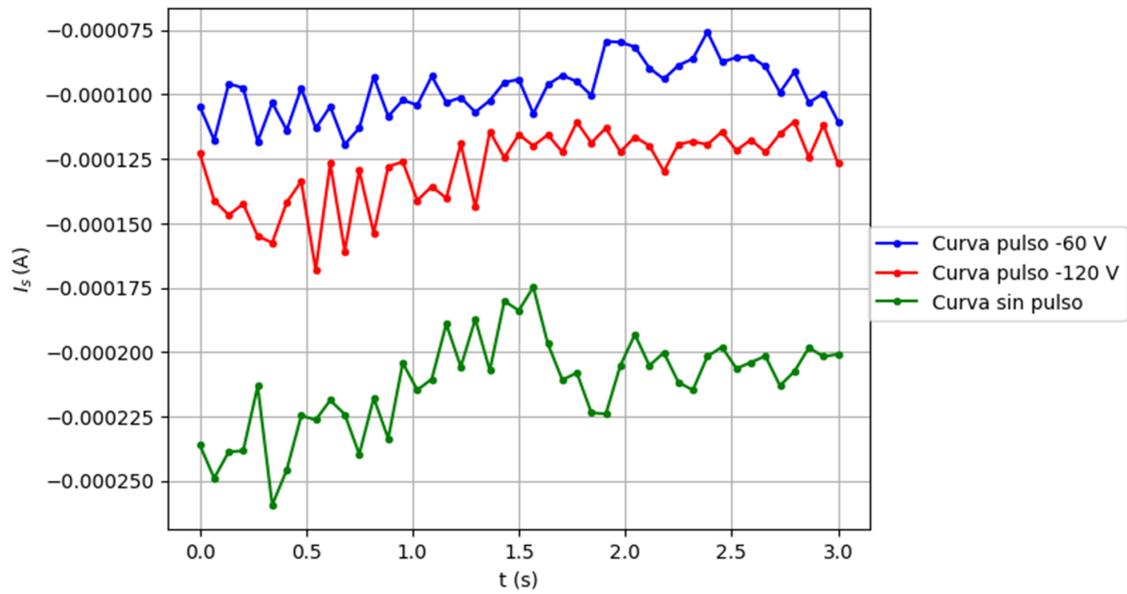


Figura 8.12: Corriente de saturación iónica en función del tiempo para el punto de medición $R = 0,3070$ m. Fuente: elaboración propia.

La magnitud del campo eléctrico poloidal en función del tiempo, a partir de lo expuesto en la sección 6.2, ecuación (6.3), en dos posiciones radiales y bajo dos condiciones distintas: con y sin la aplicación de un potencial externo en el electrodo se presenta en la Figuras 8.13 y 8.14. Se presentan los resultados únicamente esta posición radial, ya que la tendencia respecto a las demás posiciones se mantuvo similar y no hubo otros aspectos relevantes que discutir.

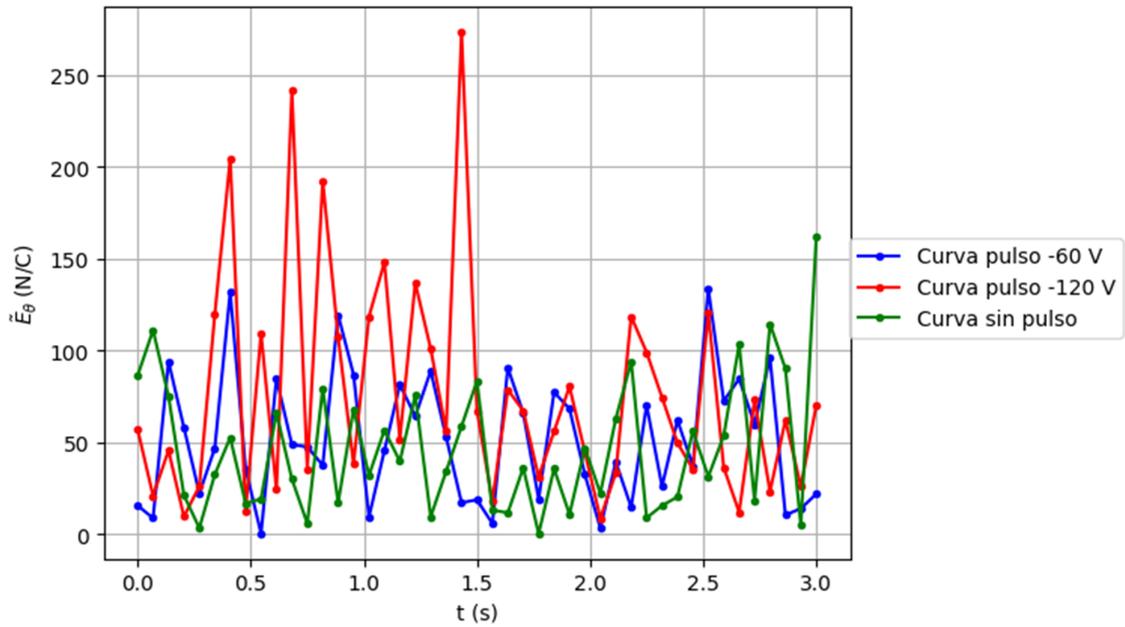


Figura 8.13: Campo eléctrico poloidal en función del tiempo para el punto de medición $R = 0,2900\text{ m}$. Fuente: elaboración propia.

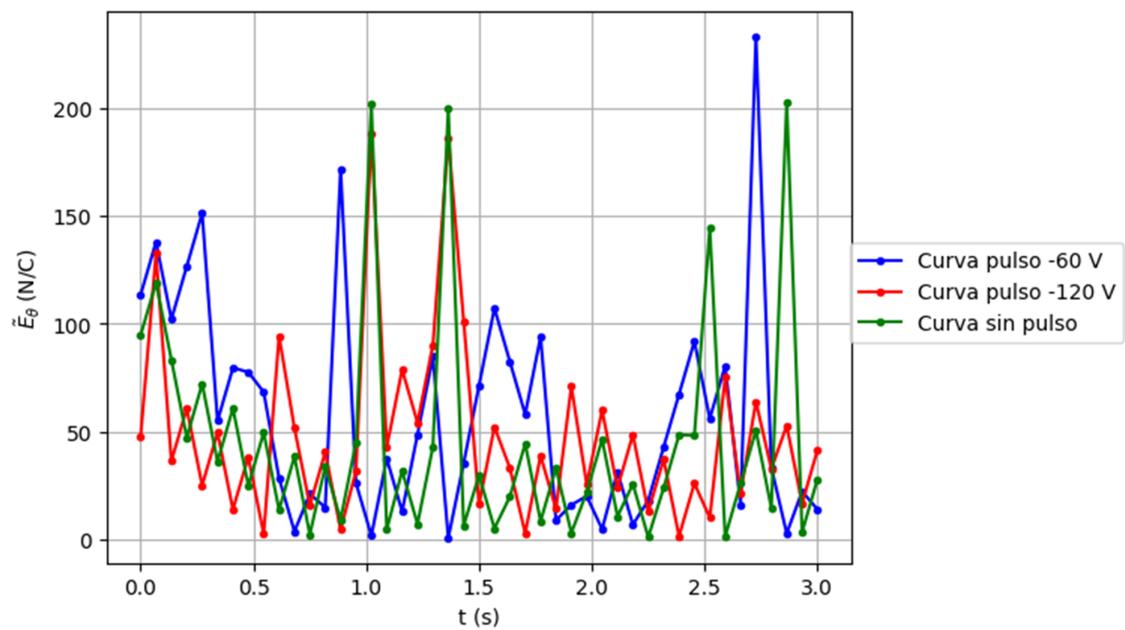


Figura 8.14: Campo eléctrico poloidal en función del tiempo para el punto de medición $R = 0,3070\text{ m}$. Fuente: elaboración propia.

Las magnitudes de las velocidades radial y poloidal, expuestas en la sección 6.2, ecuaciones (6.4) (6.5), en función del tiempo se presentan en las Figuras 8.15 a 8.18. Se consideraron las posiciones mencionadas anteriormente para el campo eléctrico poloidal.

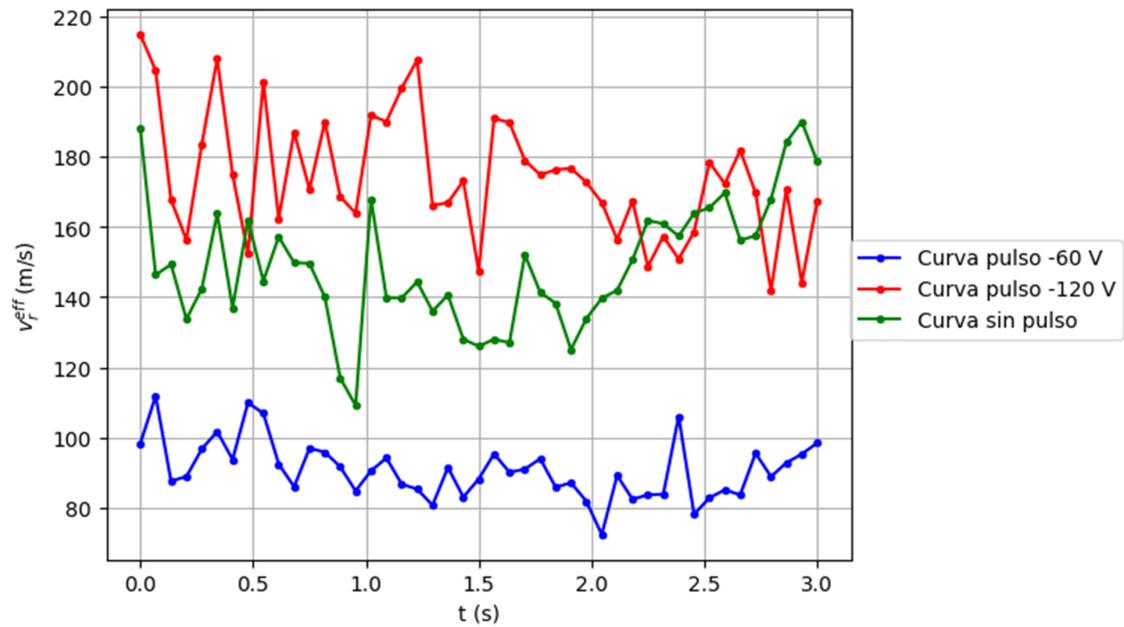


Figura 8.15: Velocidad radial de los electrones en función del tiempo para el punto de medición $R = 0,2900$ m

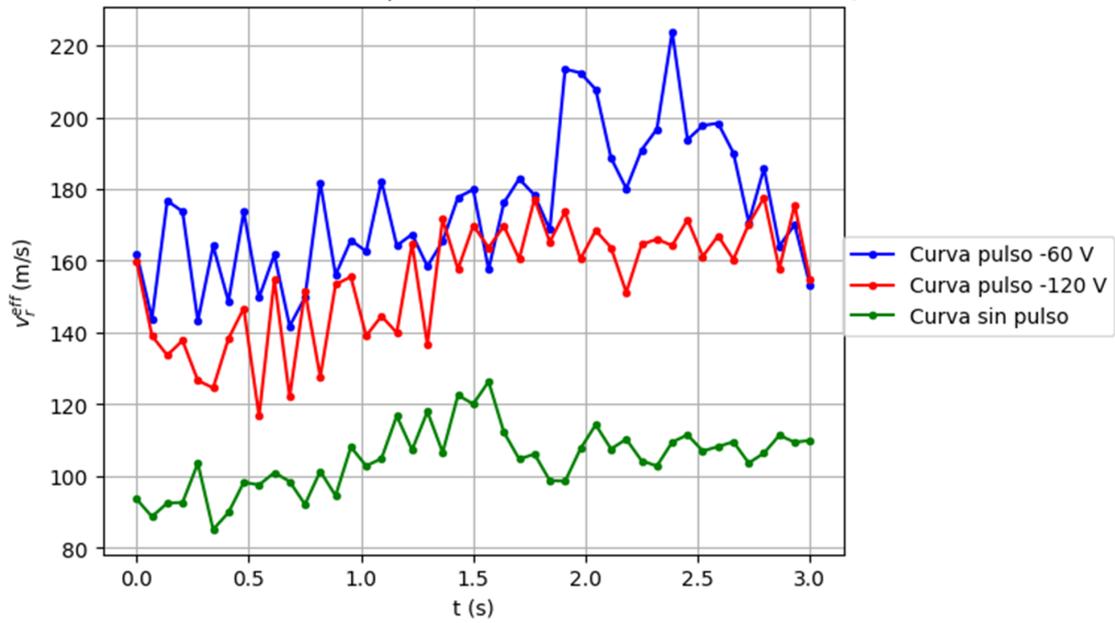


Figura 8.16: Velocidad radial de los electrones en función del tiempo para el punto de medición $R = 0,3070$ m. Fuente: elaboración propia.

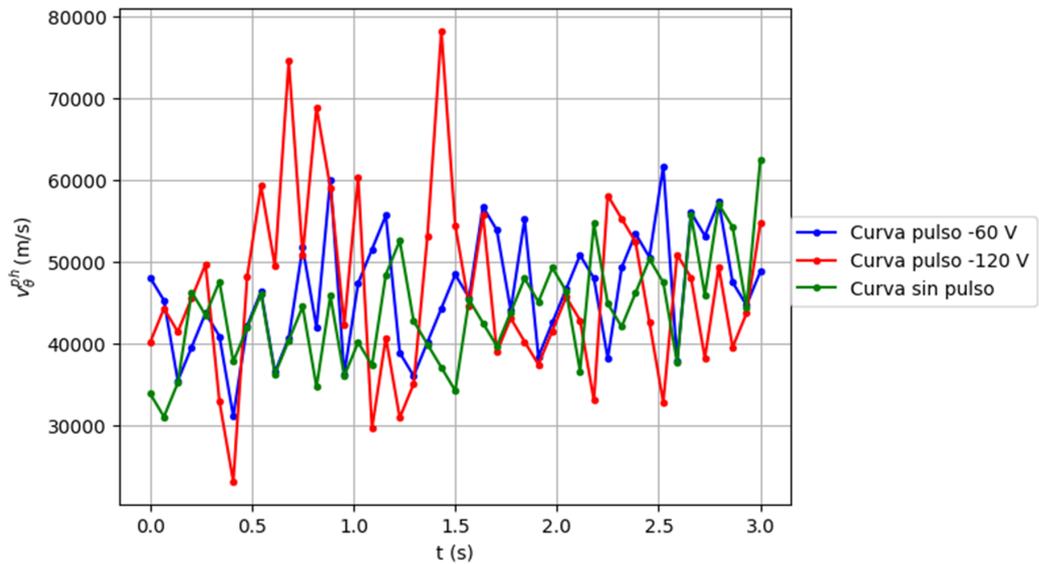


Figura 8.17: Velocidad poloidal de los electrones en función del tiempo para el punto de medición $R = 0,2900$ m. Fuente: elaboración propia.

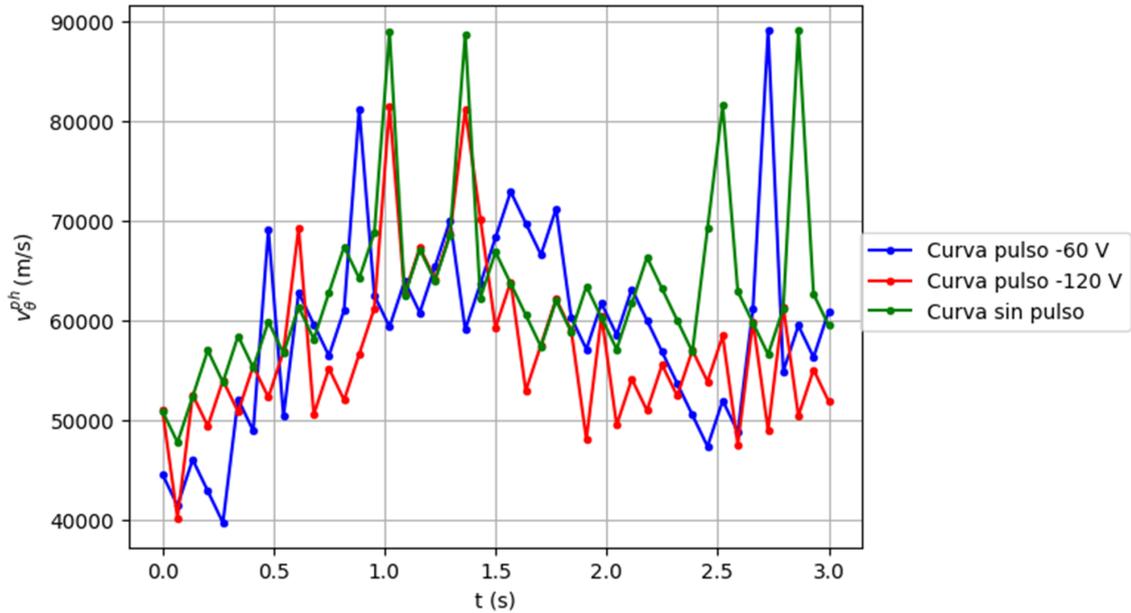


Figura 8.18: Velocidad poloidal de los electrones en función del tiempo para el punto de medición $R = 0,3070$ m. Fuente: elaboración propia.

La Tabla 8.1 presenta la estimación del flujo radial de partículas cargadas para las tres posiciones radiales estudiadas, tanto sin la aplicación de un potencial externo como con la aplicación del electrodo cargado introducido en el plasma. Este valor se obtuvo a partir de la sección 6.2, utilizando la ecuación (6.2), y se basó en lo expuesto por Grenfell et al. (2018).

Tabla 8.1: Parámetros seleccionados para los escenarios de calentamiento de microondas

Posición radial (m)	Voltaje electrodo (V)	Flujo radial (ur)
0,2900	-120	0,017
	-60	0,013
	0	0,024
0,3070	-120	0,039
	-60	0,021
	0	0,045
0,3151	-120	0,015
	-60	0,016
	0	0,014

8.3. Circuitos de alimentación

En la Figura 8.19 se muestra el circuito de alimentación propuesto para las bobinas del stellarator obtenido mediante el uso del software de simulación *PLECS*.

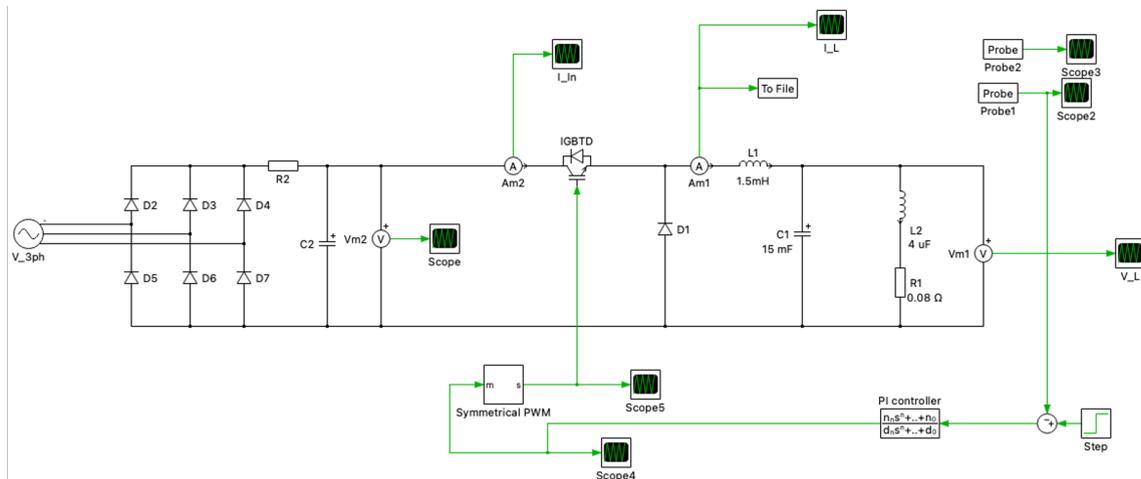


Figura 8.19: Circuito alimentador para el SCR-1. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 8.20 se muestra la onda rectificada a la salida del circuito rectificador de corriente a través del medidor de tensión $Vm2$.

Así mismo, en la Figura 8.21 se observa la corriente de salida del circuito Buck, que a su vez es la corriente que transita por las bobinas del SCR-1. La gráfica se obtiene mediante el medidor de corriente $Am1$ mostrado en la Figura 8.19.

En la Figura 8.22 se aprecia la gráfica del valor de voltaje obtenido en las bobinas del stellarator a lo largo del tiempo.

Finalmente, en la Figura 8.23 se muestran los valores resultantes para el controlador PI diseñado con *MatLab*.

8.4. Propagación de ondas

El mallado utilizado en la simulación para la cámara del stellarator y las bobinas fue extra fino, con el objetivo de obtener resultados más precisos y aproximados a la realidad. En contraste, para el área externa de la cámara se definió un mallado fino, con el fin de reducir el número de elementos en la simulación. El resultado de este mallado se muestra en la Figura 8.24, que corresponde al mallado de todo el modelo. La Figura 8.25 muestra el proceso de simulación del entorno *COMSOL Multiphysics*. Para las simulaciones del campo eléctrico generado por las bobinas de la Figura 8.26, se obtuvo como resultado la Figura 8.27 mediante el trazado de líneas. Este resultado es consistente con la forma del plasma obtenido en simulaciones anteriores, como se muestra en la Figura 7.9. En

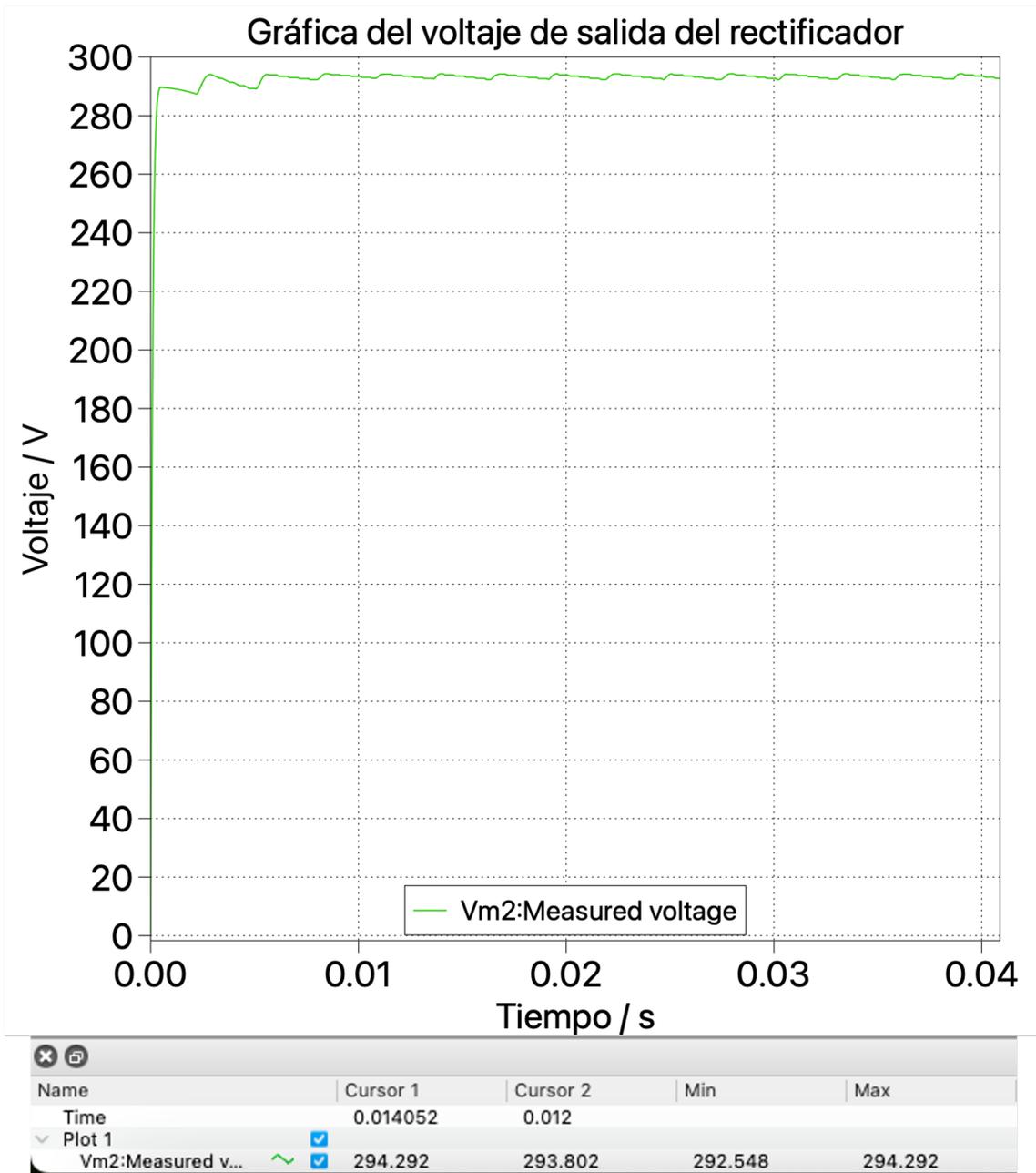


Figura 8.20: Voltaje en la salida del circuito rectificador. Fuente: elaboración propia.

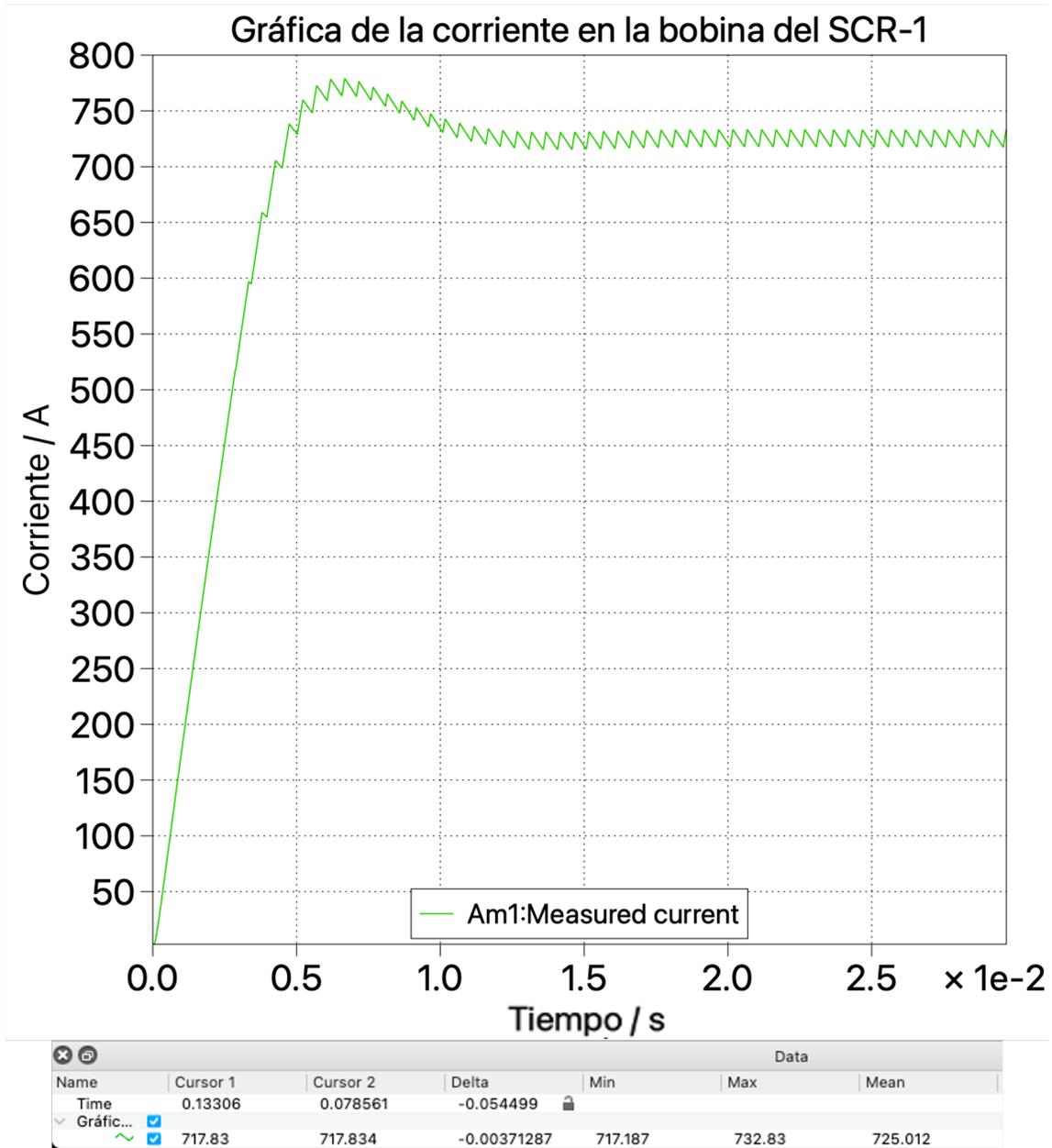


Figura 8.21: Corriente en las bobinas del SCR-1. Fuente: elaboración propia.

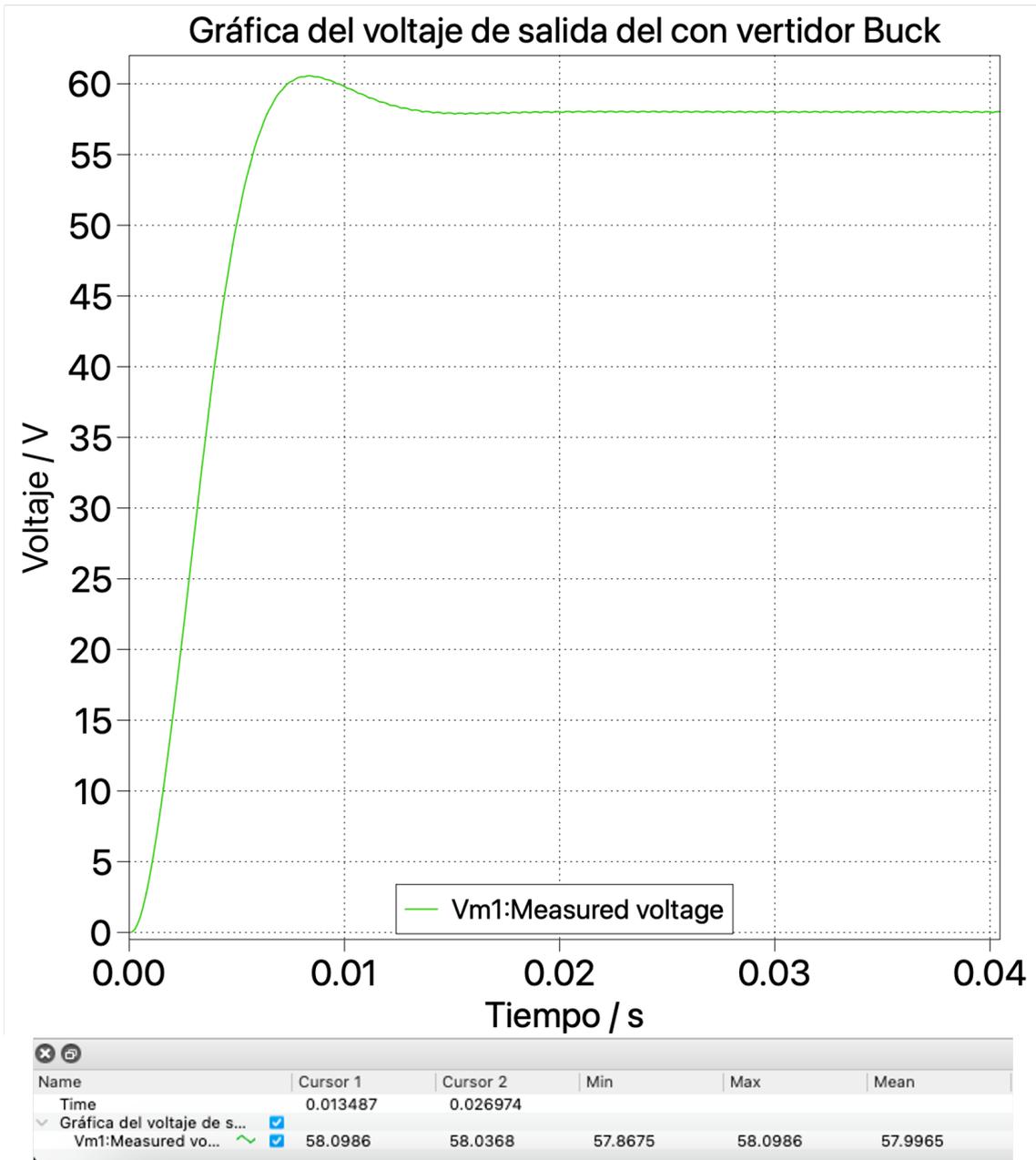


Figura 8.22: Voltaje en las bobinas del SCR-1. Fuente: elaboración propia.

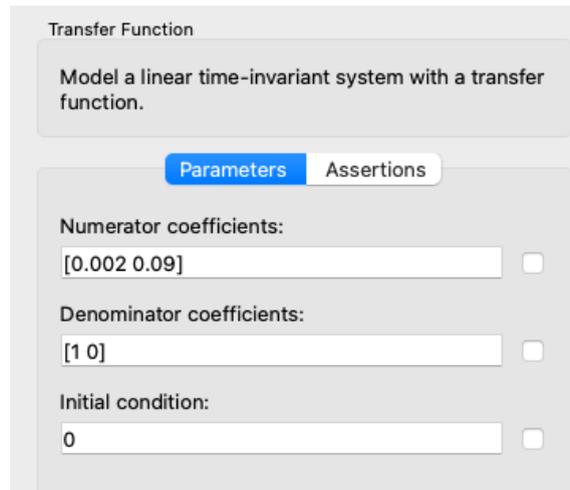


Figura 8.23: Parámetros del controlador PI propuesto. Fuente: elaboración propia.

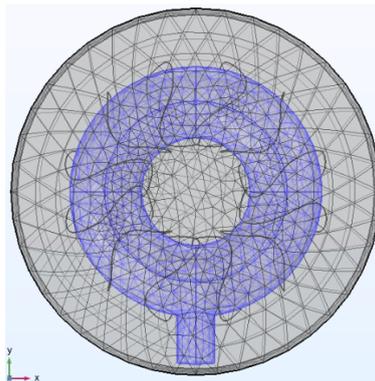


Figura 8.24: Mallado del modelo a simular. Fuente: elaboración propia.

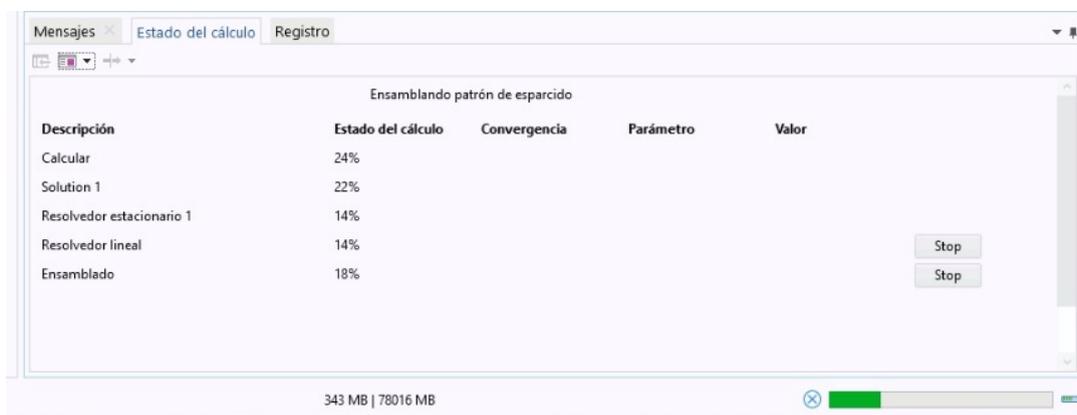


Figura 8.25: Captura de pantalla de la interfaz de *COMSOL* en pleno proceso de ejecución. Fuente: elaboración propia

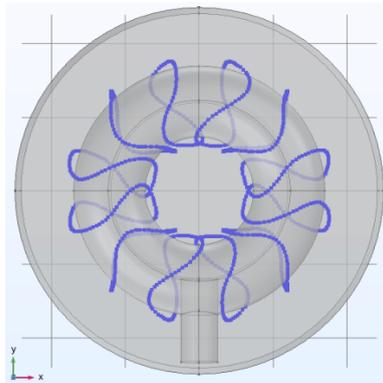


Figura 8.26: Bobinas del campo de contención del plasma del SCR-1. Fuente: elaboración propia.

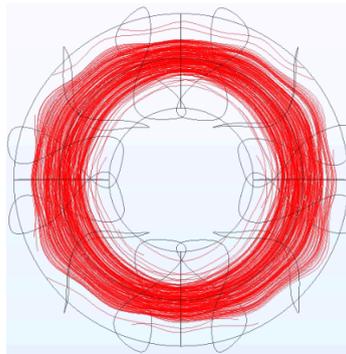


Figura 8.27: Líneas de la densidad del flujo magnético del sistema de contención del plasma. Fuente: elaboración propia.

el caso del sistema de calentamiento, donde se empleó la interfaz física "ondas electromagnéticas", se obtuvo como resultado la magnitud del campo eléctrico. Esta visualización permitió observar el recorrido de las ondas electromagnéticas a través del interior de la cámara de vacío del SCR-1, como se muestra en la Figura 8.28.

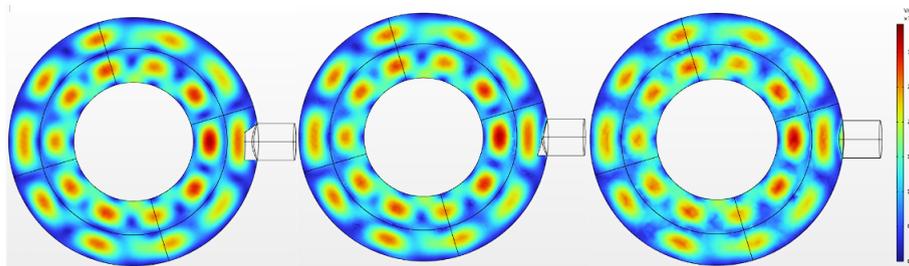


Figura 8.28: Magnitud del campo eléctrico para: a) corte modificado b) corte biselado c) Sin antenna. Fuente: elaboración propia.

El flujo laminar en la simulación corresponde al gas inyectado en la cámara del SCR-1 en donde se definió el puerto de entrada donde se inyecta el gas y el de salida el cual corresponde a la bomba de vacío, dando como resultado la superficie de presión de la figura 8.29.

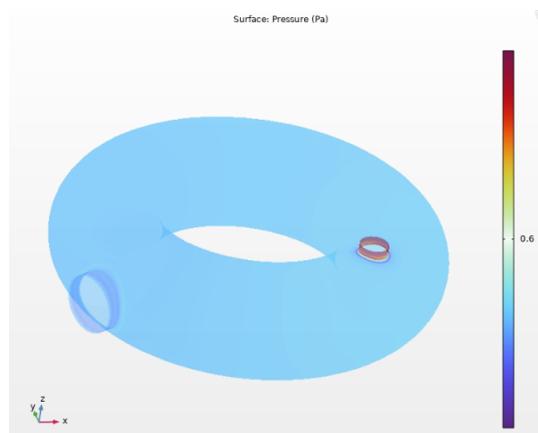


Figura 8.29: Superficie de presión del flujo laminar. Fuente: elaboración propia.

9. Discusión y conclusiones

9.1. Implementación del circuito del electrodo y medición con sonda de Langmuir

La aplicación de un voltaje de polarización en el borde del plasma puede crear un campo eléctrico radial. Este campo puede inducir un flujo poloidal cizallado (*sheared poloidal flow*), que presuntamente puede suprimir la turbulencia de borde. Los experimentos en tokamaks y stellarators han demostrado que la polarización electromagnética de los bordes puede conducir a un mejor confinamiento y una reducción de la turbulencia, ver por ejemplo Hidalgo et al. (2003). En este estudio de la turbulencia en el SCR-1, la aplicación de una señal sinusoidal como primera entrada, como se demostró en su diseño en la Figura 7.2 y su implementación experimental en las Figuras 8.1 y 8.2, resultó en la reducción de la corriente de saturación iónica y mostró consistencia entre las posiciones radiales, como se observa en las Figuras 8.11 y 8.12. Esto indicó una reducción efectiva en el flujo radial, como se detalla en la Tabla 8.1. Por consiguiente, se puede concluir que hubo una mejora en el confinamiento debido a la acción del electrodo.

Respecto la velocidad radial en la posición $R = 0,2900$ m, presentada en la Figura 8.15, esta variable experimentó una reducción significativa con la introducción del electrodo. Un comportamiento similar se observó en la posición $R = 0,3070$ m, ubicada en una región más cercana a la última superficie de flujo magnético. Estos resultados coincidieron con lo descrito en (Grenfell et al., 2018), donde se estableció que la propagación de turbulencias es principalmente activa en la región SOL. Aunque no hay una clara tendencia de la variación radial de la velocidad en las distintas circunstancias de posicionamiento del electrodo, lo cual impidió determinar el ancho del SOL, el valor del flujo fue un buen indicador para identificar dónde seguir mapeando el ancho de la región. Además, los cambios en la corriente iónica de saturación también fueron consistentes para ciertas configuraciones de posición y voltaje, ya que la polarización negativa condujo a una disminución de esta corriente en la SOL, indicando una densidad electrónica reducida.

La velocidad poloidal $\vec{E} \times \vec{B}$, mostrada en la Figura 8.17, presentó una tendencia similar bajo la acción o inacción del electrodo, aunque sería necesario reducir el ruido en la señal para poder ser más conclusivos al respecto. Por otra parte, se observó un valor promedio mayor en los momentos cruciales de la descarga de plasma, comprendidos entre los 1,5 s y 2,5 s, alcanzando su mayor confinamiento durante este período. Mejorar el control de la turbulencia en dispositivos de confinamiento mediante un electrodo polarizado implica optimizar la generación de flujos de corte $\vec{E} \times \vec{B}$, tal como lo indica Grenfell et al. (2018), en nuestro caso se tiene que precisar más particularmente

que intensidades de pulso pueden beneficiar la creación de cortes fuera de la última superficie de flujo cerrada, lo cual puede ser un objetivo de trabajo a futuro.

En la Tabla 8.1, se ha destacado un flujo radial más pronunciado en las zonas cercanas al borde en contraste con otras ubicaciones donde las líneas del campo magnético están cerradas y distantes del área de confinamiento. La inclusión del electrodo resultó en una disminución del flujo radial de partículas en las regiones adyacentes al plasma, mientras que en lugares más distantes, el potencial eléctrico generado por el electrodo aumentó la velocidad radial efectiva de las partículas cargadas. Asimismo, se observó que el potencial del electrodo a -120 V también redujo el flujo radial, aunque en menor medida que el potencial de -60 V . Estos hallazgos están en consonancia con lo descrito previamente en (Ramisch et al., 2007). Conclusiones similares a las de nuestro proyecto se dieron en Boedo et al. (2000). En general, no se pueden descartar modos de flujo de turbulencia (comunes a todas las topologías tipo *stellarator*) como modos de gradiente de temperatura de electrones (*Electron Temperature Gradient*), modos de gradiente de temperatura de iones (*Ion Temperature Gradient*), modos de electrones atrapados (*Trapped Electron Modes*) y ondas de deriva (*Drift waves*), todos ellos afectados por la acción del electrodo con resultados positivos y mitigados en menor o mayor grado con la acción del corte de flujo inducido. En nuestro caso, se descubrió que la relevancia de nuestros resultados radicó en la forma de interacción del electrodo con parámetros asociados a flujos de transporte, i.e. el valor del proyecto está en la identificación de cambios a nivel de flujo radial y poloidal dados por la aplicación del electrodo, los cuales a su vez se pueden relacionar con el transporte turbulento en los stellarators, este transporte es responsable de la mayoría de las pérdidas de energía y partículas. Mitigar este transporte a través del electrodo es lo significativo.

9.2. Circuitos de alimentación

Utilizando el software *PLECS*, se verificó exitosamente el diseño propuesto para los circuitos del sistema de alimentación del stellarator, como se muestra en las Figuras 8.20, 8.21 y 8.22. En cuanto al rectificador de onda completa, se aplicó una entrada de corriente alterna con un valor de voltaje RMS de 120 V . El rectificador de diodos funcionó según lo esperado, convirtiendo la señal de CA en una señal de CC pulsante. La Figura 8.20 demostró cómo el capacitor suavizó la señal del rectificador, reduciendo significativamente el rizado de tensión y mejorando la estabilidad de la señal de salida. Un filtrado adecuado es esencial para minimizar las fluctuaciones en el voltaje de salida del convertidor Buck. El rizado de voltaje del circuito rectificador, de acuerdo con lo mostrado en la Figura 8.20 es de aproximadamente $1,5\text{ V}$ lo que equivale a un $0,5\%$ de la tensión de entrada.

En cuanto al circuito convertidor Buck, en la Figura 8.21 se evidencia que el valor promedio de la corriente una vez estabilizada es de $725,012\text{ A}$ y presenta un rizado de $15,642\text{ A}$ lo que equivale a un $2,16\%$ de la corriente en el inductor. Ambos valores resultan adecuados para la aplicación con la cual se está trabajando. Además, en la misma Figura 8.21 se observa que el tiempo de estabilización del circuito es de aproximadamente $0,02\text{ s}$ lo cual resulta aceptable para la aplicación del stellarator, cuyo ciclo de descarga es de 8 s . En la Figura 8.22 se observa el valor de voltaje establecido para lograr la corriente de funcionamiento de las bobinas, el cual también se logra estabilizar en un periodo muy corto de tiempo ($0,02\text{ s}$).

Respecto al controlador PWM encargado de mantener el ciclo de trabajo del IGBT, no se pueden extraer conclusiones definitivas debido a que la ingeniera Murillo se incorporó en los últimos seis

meses del proyecto, y el tiempo disponible para el diseño e implementación fue insuficiente para desarrollar una validación adecuada. Sin embargo, se menciona que por medio de la simulación, ante variaciones en la carga $R1$, la corriente se mantuvo estable en su valor promedio de 725,012 A.

9.3. Propagación de ondas

Utilizando el programa *COMSOL Multiphysics*, se creó una simulación del SCR-1 en la que se analizó la física de cada uno de los módulos correspondientes. Se consideraron diversos aspectos: el sistema de calentamiento mediante el módulo de ondas electromagnéticas, la inyección de gas a través del módulo de flujo laminar y la propagación de ondas en la cámara de vacío con el módulo de campos eléctricos.

Se obtuvieron resultados utilizando los modelos de las interfaces físicas identificadas antes de la implementación del modelo de plasma. En este proceso, se creó un modelo 3D del SCR-1 y una antena Vlasov parametrizada, cuyo ángulo de corte puede ajustarse fácilmente. Esto permitió visualizar la deposición de las ondas electromagnéticas del sistema de calentamiento dentro del SCR-1 mediante la magnitud del campo eléctrico, como se muestra en la Figura 8.28. De igual manera con el campo de contención del plasma, el cual como se observó en la Figura 9.1 su forma concordó con la forma del plasma que se ha obtenido de simulaciones anteriores.

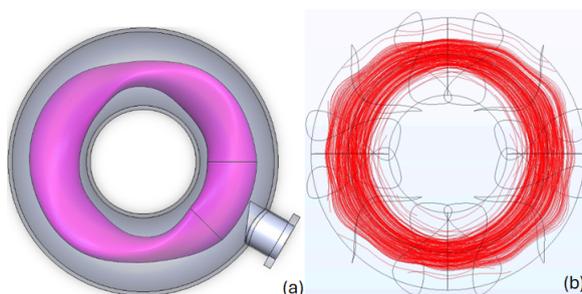


Figura 9.1: (a) Forma del plasma dentro de la cámara de vacío. (b) líneas de flujo magnético generadas por las bobinas del SCR-1

Sin embargo, la implementación del módulo de plasma presentó varios inconvenientes, entre los que se destacan:

- Las limitaciones computacionales: Esto aumenta el tiempo de simulación, provocando así un mayor tiempo para encontrar solución a los errores. Adicionalmente si se usaban métodos más rápidos para resolver la simulación daba problemas de convergencia haciendo difícil equilibrar la configuración de los métodos numéricos usados.
- Simetría: Debido a que el SCR-1 no es simétrico no se puede optar por modelos de simulación más sencillos en 2D, por lo cual solo se puede simular un modelo 3D aumentando en gran medida el número de elementos que se tienen que simular haciendo más complicado la convergencia de la simulación.

- Problemas de licencias: Las simulaciones de *COMSOL Multiphysics* se llevaron a cabo gracias a la colaboración con la Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales, donde se proporcionó el acceso a un servidor con el software mencionado. En el transcurso del desarrollo de la antena se presentaron problemas con la licencia en donde no se pudo acceder al programa. Lo anterior ralentizó el proceso para obtener los resultados.

10. Recomendaciones

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

1. Sería crucial explorar las turbulencias de primera entrada utilizando un código girocinético. Este tipo de código permitiría estimar los gradientes de densidad electrónica y temperatura electrónica, lo que daría una mejor comprensión de las posibles regiones donde se establece el flujo de partículas turbulento.
2. Es necesario la mejor delimitación de área la SOL (*scrape off layer*) para poder mejorar el posicionamiento del electrodo en miras de una mejor reducción de los flujos turbulentos que podrían ser disruptivos. Además el equipo para la creación de circuitos electrónicos básicos se debe mejorar en el laboratorio de Plasmas.
3. Diseñar e implementar sistemas de enfriamiento adecuados, como disipadores de calor grandes, ventiladores o incluso refrigeración líquida para manejar la disipación de energía térmica en el circuito de potencia.
4. Previo a la implementación del circuito de potencia y su respectivo control, realizar pruebas de menor potencia utilizando baterías de menor voltaje e ir incrementándolo para asegurar de forma segura su funcionamiento.
5. Con el fin de hacer más económico el diseño, proponer varios convertidores Buck en paralelo en lugar de uno completo. Los requerimientos de corriente para cada convertidor individual serán significativamente menores, por lo que los costos también se reducen.
6. Utilizar trazas de cobre gruesas y planos de tierra para manejar la alta corriente cuando se diseñe la PCB del circuito.
7. Es importante la búsqueda de otra plataforma para el uso del programa de simulación COMSOL Multiphysics, esto debido a la necesidad de tener un equipo más potente que disminuya los tiempo de simulación permitiendo así agilizar el proceso de solucionar errores.
8. Utilizar en futuros diseños de la antena diferentes diseños como la adicción de laminas reflectivas que modifiquen de diferente manera la incidencia de las ondas que inciden en el SCR-1.

Referencias

- T. Anderson. *Plasma antennas*. Artech House, 2020.
- M. Ariola, A. Pironti, et al. *Magnetic control of tokamak plasmas*, volume 187. Springer, 2008.
- J. Asenjo, V. I. Vargas, and J. Mora. Control and data acquisition system for scr-1 stellarator. *Fusion Engineering and Design*, 129:263–268, abril 2018. doi: 10.1016/j.fusengdes.2018.02.061.
- N. Bisai and A. Sen. Theory of plasma blob formation and its numerical and experimental validations. *Reviews of Modern Plasma Physics*, 7(1):22, 2023.
- J. Boedo, D. Gray, S. Jachmich, R. Conn, G. Terry, G. Tynan, G. Oost, and R. Weynants. Enhanced particle confinement and turbulence reduction due to $e \times b$ shear in the textor tokamak. *Nuclear Fusion - NUCL FUSION*, 40:1397–1410, 07 2000. doi: 10.1088/0029-5515/40/7/309.
- F. F. Chen and J. P. Chang. *Lecture notes on principles of plasma processing*. Springer Science & Business Media, 2003.
- A. Dinklage, T. Klinger, G. Marx, and L. Schweikhard. *Plasma physics: confinement, transport and collective effects*, volume 670. Springer Science & Business Media, 2005.
- R. W. Erickson and D. Maksimovic. *Fundamentals of Power Electronics*. Springer Science & Business Media, 2nd edition, 2007. ISBN 978-0-7923-7270-7.
- F. Moumtadi and A. Coronado. *Metodología para la obtención del patrón de radiación y prueba de aislamiento en sistemas de comunicaciones vía satélite*. 2006.
- P. Fu et al. Review and analysis of the ac/dc converter of iter coil power supply. In *2010 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Palm Springs, CA, USA, 2010. doi: 10.1109/apec.2010.5433479.
- O. E. Garcia, R. Kube, A. Theodorsen, and H. Pécseli. Stochastic modelling of intermittent fluctuations in the scrape-off layer: Correlations, distributions, level crossings, and moment estimation. *Physics of Plasmas*, 23(5), 2016.
- M. Ghoranneviss, A. Salar Elahi, M. Tajdidzadeh, S. Mohammadi, R. Arvin, M. Gheydi, and A. Abbaspour Tehrani Fard. Design, Construction, and Installation of Movable Electrode Biasing System on Tokamak. *Journal of Fusion Energy*, 29(5):467–470, Oct. 2010. doi: 10.1007/s10894-010-9307-x.

- Gobierno de Costa Rica. Decreto 36569 de 2011 (con fuerza de ley). Diario Oficial La Gaceta No. 93., 2011. URL https://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=70253&nValor3=84732&strTipM=TC. Consultado: 19 de junio de 2024.
- J. González and P. Martínez. Control de corriente en sistemas de alta potencia. *Revista de Electrónica y Potencia*, 15(2):123–135, 2020. doi: 10.1234/rep.2020.152.01.
- I. Grajales, J. Umaña, N. Chinchilla, K. Mora, and R. Garita. Tec hace primera descarga de plasma en dispositivo único en latinoamérica. *Investiga. TEC*, (27):5–5, septiembre 2016. ISSN 1659-3383.
- G. Grenfell, B. P. Van Milligen, U. Losada, W. Ting, B. Liu, C. Silva, M. Spolaore, C. Hidalgo, et al. Measurement and control of turbulence spreading in the scrape-off layer of tj-ii stellarator. *Nuclear Fusion*, 59(1):016018, 2018.
- D. W. Hart. *Power Electronics*. McGraw-Hill Education, 2010. ISBN 978-0-07-338067-4.
- C. Hidalgo, A. Pedrosa, N. Dreval, K. Mccarthy, L. Eliseev, M. Ochando, T. Estrada, I. Pastor, E. Ascasibar, E. Calderón, A. Cappa, A. Chmyga, A. Fernández, B. Gonçalves, J. Herranz, J. Jiménez, S. Khrebtov, A. Komarov, A. Kozachek, and D. Tafalla. Improved confinement regimes induced by limiter biasing in the tj-ii stellarator. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 46:287, 12 2003. doi: 10.1088/0741-3335/46/1/018.
- IAEA. *Fusion Physics*. Non-serial Publications. Vienna, 2012. ISBN 978-92-0-130410-0. URL <https://www.iaea.org/publications/8879/fusion-physics>.
- K. Ida. Non-local transport nature revealed by the research in transient phenomena of toroidal plasma. *Reviews of Modern Plasma Physics*, 6(1):2, 2022.
- U. S. Inan and M. Golkowski. *Principles of Plasma Physics for Engineers and Scientists*. Cambridge University Press, 2011. ISBN 0521193729; 9780521193726.
- Instituto Tecnológico de Costa Rica, Consejo Institucional. Acta aprobada sesión ordinaria no. 2647, 2010. URL <https://www.tec.ac.cr/2010-actas-consejo-institucional>. Consultado: 19 de junio de 2024.
- T. Instruments. Understanding buck power stages in switchmode power supplies. Technical Report SLVA057, Texas Instruments, 2015. URL <https://www.ti.com/lit/an/slva057/slva057.pdf>.
- D. Jiménez, L. Campos-Duarte, R. Solano-Piedra, LA. Araya-Solano, E. Meneses, and V. I. Vargas. Bs-soltra: Towards a parallel magnetic plasma confinement simulation framework for modular stellarator devices. In *Latin America High Performance Computing Conference (CARLA2019)*, Septiembre 2019.
- M. Johnston, P. Kumar, and L. Smith. Application of pi controllers in power converters: Theory and practice. *Journal of Power Electronics*, 17(5):123–135, 2020. doi: 10.1109/JPE.2020.123456.
- E. F. Kuester. *Theory of waveguides and transmission lines*. Crc Press, 2020.
- A. Melnikov, L. Eliseev, T. Estrada, E. Ascasibar, A. Alonso, A. Chmyga, C. Hidalgo, A. Komarov, A. Kozachek, L. Krupnik, et al. Changes in plasma potential and turbulent particle flux in the core plasma measured by heavy ion beam probe during l–h transitions in the tj-ii stellarator. *Nuclear Fusion*, 53(9):092002, 2013.

- H. M. E. Misilmani, M. Al-Husseini, and K. Y. Kabalan. *Improved Vlasov Antenna with Curved Cuts and Optimized Reflector Position and Shape*. 2015.
- N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins. *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. John Wiley & Sons, 3rd edition, 2002. ISBN 978-0-471-22693-2.
- N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins. *Power electronics: converters, applications, and design*. John wiley & sons, 2003.
- J. Mora, I. Vargas-Blanco, and J. Asenjo-Castillo. Diseño de un regulador de corriente eléctrica para las bobinas modulares del stellarator scr-1. *Tecnología En Marcha*, 30(5):21–29, 2017. doi: 10.18845/tm.v30i5.3220.
- I. Nascimento, Y. Kuznetsov, J. Severo, A. Fonseca, A. Elfimov, V. Bellintani, M. Machida, M. Heller, R. Galvao, E. Sanada, and J. Elizondo. Plasma confinement using biased electrode in the tcabr tokamak. *Nuclear Fusion*, 45:796, 07 2005. doi: 10.1088/0029-5515/45/8/005.
- K. Ogata. *Modern Control Engineering*. Prentice Hall, 5th edition, 2010. ISBN 978-0136156734.
- K. Okamoto. *Fundamentals of optical waveguides*. Elsevier, 2021.
- J. P. Ortiz Jarquin. *Diseño de un sistema integrado para la caracterización del plasma mediante Sonda de Langmuir*. Trabajo final de graduación, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, 2019. Tesis de Graduación para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura.
- PlasmaTEC-ITCR. Sonda de langmuir. <https://gitlab.com/plasmatec-itcr/computational-physics/sonda-de-langmuir>, marzo 2023. Accesado el 30 de mayo del 2024.
- A. I. Pressman, K. Billings, and T. Morey. *Switching Power Supply Design*. McGraw-Hill Education, 3rd edition, 2009. ISBN 978-0-07-148272-1.
- M. Ramisch, F. Greiner, N. Mahdizadeh, K. Rahbarnia, and U. Stroth. Observation of large-scale coherent structures under strong $e \times b$ shear in the torsatron tj-k. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 49(6):777, 2007.
- A. Salar Elahi, M. Ghoranneviss, S. Mohammadi, and R. Arvin. Design and manufacturing of the electrode biasing system for the tokamak. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 40(3):892–897, 2012. doi: 10.1109/TPS.2012.2182990.
- R. Solano-Piedra. Simulación de escenarios de calentamiento por microondas para conocer las condiciones de la propagación de ondas de bernstein electrónicas en el plasma del stellarator scr-1. Master’s thesis, Universidad de Costa Rica, Sistema de Estudios de Posgrado, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica, 2024.
- H. Trimiño. Design of an ech system for a small modular stellarator. In *2011 Abstracts IEEE International Conference on Plasma Science*, pages 1–1. IEEE, 2011.
- A. M. Trzynadlowski. *Introduction to modern power electronics*. John Wiley & Sons, 2015.
- V. I. Vargas et al. Implementation of stellarator of costa rica 1 scr-1. In *2015 IEEE 26th Symposium on Fusion Engineering (SOFE)*, pages 1–6, Austin, TX, USA, 2015. doi: 10.1109/SOFE.2015.7482321.

- R. R. Weynants, G. van Oost, G. Bertschinger, J. Boedo, P. Brys, T. Delvigne, K. H. Dippel, F. Durodié, H. Euringer, K. H. Finken, D. S. Gray, J. D. Hey, D. L. Hillis, J. T. Hogan, L. Konen, R. Leners, A. M. Messiaen, A. Pospieszczyk, U. Samm, R. P. Schorn, B. Schweer, G. Telesca, R. van Nieuwenhove, and P. E. Vandenplas. Confinement and profile changes induced by the presence of positive or negative radial electric fields in the edge of the textor tokamak. *Nuclear Fusion*, 32:837 – 853, 1992. URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:250832932>.
- A. Yoshizawa, S. I. Itoh, and K. Itoh. *Plasma and fluid turbulence: theory and modelling*. CRC Press, 2002.