

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Electrónica



**Desarrollo de un sistema de adquisición y procesamiento de datos de los diagnósticos del plasma del SCR-1: sonda Langmuir e interferómetro heterodino.**

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura

Christian Alonso Soto Soto

Cartago, 25 de junio, 2013

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas. En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.



Christian Soto Soto

Cartago, 25 de junio, 2013

Céd.: 1-1340-0592

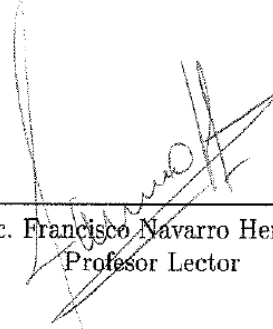
Instituto Tecnológico de Costa Rica  
Escuela de Ingeniería Electrónica  
Proyecto de Graduación  
Tribunal Evaluador

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniera en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal



Dr. Saúl Guadamuz Brenes  
Profesor Lector



M.Sc. Francisco Navarro Henríquez  
Profesor Lector



M.Eng. Johan Carvajal Godínez  
Profesor Asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica.

Cartago, 25 de junio de 2013

# Resumen

En el presente informe se expone el proceso de diseño e implementación de un sistema de adquisición y procesamiento de datos de los diagnósticos del plasma generado en el Laboratorio de Plasmas para la Energía de Fusión y Aplicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Anteriormente no existía una interfaz entre los transductores utilizados para diagnosticar el plasma y una plataforma computacional, lo que representaba una limitación en la investigación del plasma.

Por lo anterior, este proyecto presenta el desarrollo de una interfaz que permita a los investigadores tener los valores de temperatura y densidad electrónica del plasma en una estación de trabajo programable, en la cual se centraliza la información para facilitar su síntesis, visualización e interacción con el usuario del sistema.

Para el desarrollo del proyecto se utilizó la plataforma LabVIEW de National Instruments y se divide en dos partes, una primera presenta el desarrollo del sistema de adquisición y procesamiento de datos de la sonda Langmuir para obtener los valores de los parámetros de temperatura y densidad electrónica y una segunda parte en la que se muestra el proceso de desarrollo del sistema para el interferómetro heterodino de microondas con el cual se obtiene, de una manera mucho más precisa, el valor de la densidad electrónica. Finalmente se crea una interfaz de usuario para la visualización de los parámetros obtenidos.

**Palabras clave:** Plasma, sonda Langmuir, interferómetro heterodino, LabVIEW.

# Abstract

This report describes the design and implementation process of a data acquisition and processing system for the diagnostics of the plasma generated in the Laboratorio de Plasmas para la Energía de Fusión y Aplicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Previously, there was no interface between the sensors used to diagnose the plasma and a computational platform, which represents a limitation in investigating the plasma.

That is why this project presents the development of an interface that allows researchers to have important plasma parameters in a programmable work station, which centralizes the information to facilitate their synthesis, visualization and user interaction with the system .

To develop this project National Instruments LabVIEW was used. The process is divided in two parts, the first presents the development of data acquisition system of the Langmuir probe to obtain the values of electron temperature and density and a second part which shows the development process of the microwave heterodyne interferometer to obtain in a more precise way the electron density of the plasma. Finally a user interface for displaying the parameters obtained was created.

**Keywords:** Plasma, Langmuir probe, heterodyne interferometer, LabVIEW.

# Agradecimientos

Un agradecimiento especial a mi profesor asesor el M.Eng. Johan Carvajal Godínez quien con sus constantes aportes hizo posible la realización de este proyecto.

Agradezo al Dr. Celso Ribeiro por toda la ayuda que brindó para poder cumplir con los objetivos del proyecto.

Agradezco también a la empresa National Instruments Costa Rica por brindarme la oportunidad de realizar este proyecto con ellos mediante su programa de pasantías y al Laboratorio de Plasmas para la Energía de Fusión y Aplicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica por la oportunidad de aplicar este proyecto en sus instalaciones.

Christian Soto

Cartago, 27 de junio de 2013

# Índice general

<b>Índice de figuras</b>	<b>v</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>1</b>
<b>1. Formulación del proyecto</b>	<b>2</b>
1.1. Introducción . . . . .	2
1.1.1. Fusión termonuclear . . . . .	2
1.1.2. Stellarator . . . . .	2
1.1.3. Diagnóstico de plasma mediante sonda de Langmuir . . . . .	4
1.1.4. Diagnóstico de plasma mediante interferómetro heterodino . . . . .	4
1.2. Entorno del proyecto . . . . .	4
1.2.1. National Instruments . . . . .	4
1.2.2. Laboratorio de Plasmas y sus Aplicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica . . . . .	5
1.2.3. Impacto de proyecto . . . . .	5
1.3. Antecedentes del Proyecto . . . . .	5
1.4. Análisis de la problemática . . . . .	6
1.4.1. Descripción del sistema a intervenir . . . . .	6
1.4.2. Descripción general del problema . . . . .	6
1.4.3. Requerimientos y restricciones de la necesidad . . . . .	7
1.4.4. Síntesis del problema . . . . .	7
1.5. Meta . . . . .	8
1.6. Objetivos . . . . .	8
1.6.1. Objetivo general . . . . .	8
1.6.2. Objetivos específicos . . . . .	8
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>9</b>
2.1. Diagnóstico de temperatura electrónica mediante sonda Langmuir . . . . .	9
2.1.1. Concepto de Temperatura Electrónica del Plasma [8] . . . . .	9
2.1.2. Sonda Langmuir . . . . .	10

2.1.3.	Curva I - V de la sonda Langmuir . . . . .	11
2.1.4.	Parámetros de la curva característica. . . . .	12
2.1.5.	Proceso de medición de temperatura electrónica . . . . .	13
2.1.6.	Proceso de medición de densidad electrónica . . . . .	13
2.2.	Diagnóstico del plasma mediante interferómetro heterodino . . . . .	14
2.2.1.	Densidad Electrónica del Plasma . . . . .	14
2.2.2.	Interferómetro Heterodino de Microondas . . . . .	14
2.2.3.	Métodos de detección del cambio de fase. . . . .	15
2.2.4.	Frecuencia de Operación . . . . .	17
2.3.	Stellarator SCR-1 . . . . .	17
2.3.1.	Historia y Objetivos . . . . .	17
2.3.2.	Especificaciones del SCR-1 . . . . .	17
2.3.3.	Diagnósticos del stellarator SCR-1 . . . . .	17
2.4.	Instrumentación Virtual : LabVIEW . . . . .	19
<b>3.</b>	<b>Procedimiento metodológico</b>	<b>21</b>
3.1.	Etapas de desarrollo . . . . .	21
3.1.1.	Entrenamientos y revisión bibliográfica . . . . .	21
3.1.2.	Requerimientos de hardware . . . . .	21
3.1.3.	Ensamble de la sonda Langmuir . . . . .	22
3.1.4.	Ensamble del interferómetro heterodino de microondas . . . . .	22
3.1.5.	Diseño e implementación del sistema de adquisición y su interfaz en el computador . . . . .	22
3.2.	Solución final . . . . .	22
3.3.	Diseño Experimental . . . . .	23
<b>4.</b>	<b>Sistema de adquisición y procesamiento de los diagnósticos del plasma del SCR-1: sonda Langmuir e interferómetro heterodino.</b>	<b>24</b>
4.1.	Descripción general de sistema implementado . . . . .	24
4.1.1.	Descripción a nivel de hardware . . . . .	24
4.1.2.	Descripción a nivel de software . . . . .	25
4.2.	Descripción detallada de la organización del hardware utilizado . . . . .	26
4.3.	Descripción detallada de la implementación del software . . . . .	30
4.3.1.	Control de adquisición y procesamiento de datos de la sonda Langmuir . . . . .	30
4.3.1.1.	Configuración de la comunicación serie con el Keithley 2425. . . . .	30
4.3.1.2.	Configuración de la adquisición de datos de sonda Lang- muir . . . . .	31



4.3.1.3.	Controlador del motor pasos. . . . .	35
4.3.1.4.	Algoritmos de procesamiento de datos para calcular los parámetros de temperatura y densidad electrónica, potencial flotante y corriente de saturación del plasma. . . . .	36
4.3.1.5.	Adquisición y procesamiento de datos del interferómetro heterodino de microondas. . . . .	39
<b>5.</b>	<b>Análisis de resultados</b>	<b>42</b>
5.1.	Resultados experimentales . . . . .	42
5.1.1.	Sonda Langmuir . . . . .	42
5.1.2.	Interferómetro heterodino . . . . .	49
5.2.	Análisis de resultados . . . . .	50
<b>6.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>53</b>
6.1.	Conclusiones . . . . .	53
6.2.	Recomendaciones . . . . .	53

# Índice de figuras

1.1. Proceso de generación de energía mediante fusión nuclear. . . . .	3
1.2. Diagrama de un stellataror[4]. . . . .	3
2.1. Distribución Maxwelliana de velocidad.[8] . . . . .	10
2.2. Curva IV ideal de la sonda Langmuir[21]. . . . .	11
2.3. Diagrama de conexión de la sonda Langmuir.[9] . . . . .	13
2.4. Medición de temperatura electrónica a partir de la curva IV.[9] . . . . .	14
2.5. Diagrama conexión general de un interferómetro de microondas.[11] . . . . .	15
2.6. Retraso en el tiempo generado por $\Delta\phi_p$ en la señal $V_2$ con respecto a $V_1$ . [11] . . . . .	16
2.7. Sonda Langmuir del SCR-1[15]. . . . .	19
2.8. Interferómetro de Microondas para el SCR-1[17]. . . . .	20
3.1. Componentes del sistema empotrado cRIO[1]. . . . .	23
4.1. Diagrama de bloques del sistema . . . . .	25
4.2. Diagrama de estados general del sistema. . . . .	25
4.3. Tarjeta de adquisición de datos PCI DAS 4020/12 de Measurement Computing. . . . .	26
4.4. Sistema cRIO utilizado para la adquisición de datos de la sonda Langmuir. . . . .	27
4.5. Módulos NI 9870 y NI 9501 utilizados en el sistema de adquisición de datos de la sonda Langmuir. . . . .	27
4.6. Partes de la sonda de Langmuir del SCR-1. . . . .	28
4.7. Keithley 2425 (Parte frontal y trasera). . . . .	28
4.8. Circuito de medición del voltaje de polarización y corriente de la sonda. . . . .	29
4.9. Diagrama de conexión entre el motor de pasos de la sonda y su controlador.[13] . . . . .	30
4.10. VI para configurar puerto serie. . . . .	31
4.11. Diagrama de flujo de adquisición de datos de la sonda. . . . .	32
4.12. Configuración del Keithley mediante comandos SCPI. . . . .	33
4.13. Código de espera hasta llenar el buffer. . . . .	34
4.14. Diagrama de flujo de Keithley 2425. . . . .	35

4.15. Control de posicionamiento de la sonda (RT). . . . .	36
4.16. Control del posicionamiento de la sonda (FPGA). . . . .	36
4.17. Diagrama del procesamiento de datos de la sonda de Langmuir. . . . .	37
4.18. Código para ejecutar algoritmos de procesamiento de los datos. . . . .	38
4.19. SubVI <i>Data Proces</i> para calcular temperatura y densidad electrónica. . .	39
4.20. Configuración de tareas de la tarjeta PCI DAS 4020/12. . . . .	40
4.21. Adquisición de datos del Interferómetro. . . . .	41
4.22. VI para determinar el desfase entre ambas señales. . . . .	41
5.1. Sonda Langmuir para el SCR-1. . . . .	42
5.2. Gráfica I vs V de referencia. . . . .	43
5.3. Curva de corriente obtenida con NI 9227. . . . .	43
5.4. Rampa de tensión generada de manera automática. . . . .	44
5.5. Medición de corriente de la sonda vs números de puntos en el buffer. . .	44
5.6. Gráfica I vs V obtenida con el sistema implementado. . . . .	45
5.7. Región de corriente de saturación. . . . .	45
5.8. Potencial flotante del plasma. . . . .	46
5.9. Corrección de la corriente de la sonda. . . . .	46
5.10. Corriente de electrones. . . . .	47
5.11. Ajustes lineales para determinar la temperatura electrónica y el poten- cial del plasma. . . . .	47
5.12. Interfaz de la curva I vs V. . . . .	48
5.13. Interfaz de análisis de la gráfica. . . . .	48
5.14. Valores de los parámetros del plasma mostrados en la interfaz de usuario. .	49
5.15. Interfaz en el computador del interferómetro. . . . .	50

# Índice de tablas

2.1. Especificaciones del SCR-1[15] . . . . .	18
4.1. Parámetros para comunicación con Keithley 2425 . . . . .	30
5.1. Parámetros obtenidos del plasma generado en la cámara de aplicaciones industriales. . . . .	48
5.2. Registro de eventos del proceso de generación y diagnóstico del plasma.	49

# Capítulo 1

## Formulación del proyecto

### 1.1. Introducción

#### 1.1.1. Fusión termonuclear

Todos los átomos se dividen en tres partículas fundamentales: el protón, el neutrón y el electrón. El principio básico del proceso de fusión es, precisamente, fusionar dos núcleos ligeros, en general hidrógeno y sus isótopos (deuterio y tritio)[19], para formar un núcleo más pesado, liberando una gran cantidad de energía. La figura 1.1 muestra la forma de liberación de energía mediante la fusión nuclear. Al unir dos núcleos se generan fuertes fuerzas de repulsión, debido a la polaridad positiva del núcleo, para poder superar dichas fuerzas se deben utilizar átomos ligeros a presiones y temperaturas extremadamente altas, similares a las que existen en el centro del sol (15 millones de  $^{\circ}$  C). A temperaturas tan elevadas cualquier gas se convierte en plasma.

El plasma puede ser descrito como un gas cargado eléctricamente, donde los electrones, cargados negativamente, están completamente separados de los núcleos atómicos cargados positivamente (o iones). Aunque el plasma se encuentra raramente en la tierra, se estima que más de 99 % del universo existe en forma de plasma[3].

#### 1.1.2. Stellarator

Para producir la energía, el plasma debe cumplir con el criterio de Lawson. Son tres los parámetros que definen este criterio: temperatura del plasma, densidad del plasma y tiempo de confinamiento y deben cumplirse simultáneamente [6]. El producto de estos tres criterios se llama producto triple de fusión. Científicos han construido dispositivos capaces lograr este confinamiento, el cual se logra mediante fuertes campos magnéticos que impiden a los gases ionizados del plasma escapar.

Uno de estos dispositivos es el denominado Stellarator el cual básicamente consiste en una cámara de reacción toroidal, con bobinas externas que generan el campo magnético que confina el plasma dentro de la misma. La figura 1.2 muestra una representación gráfica del Stellarator.

Para mejorar las ventajas y aplicaciones del plasma, en torno a la producción eficiente de energía, se debe de caracterizar el plasma generado en diferentes condiciones experimentales. Para realizar estos diagnósticos se utilizan principalmente dos equipos: la Sonda de Langmuir y el Interferómetro Heterodino.

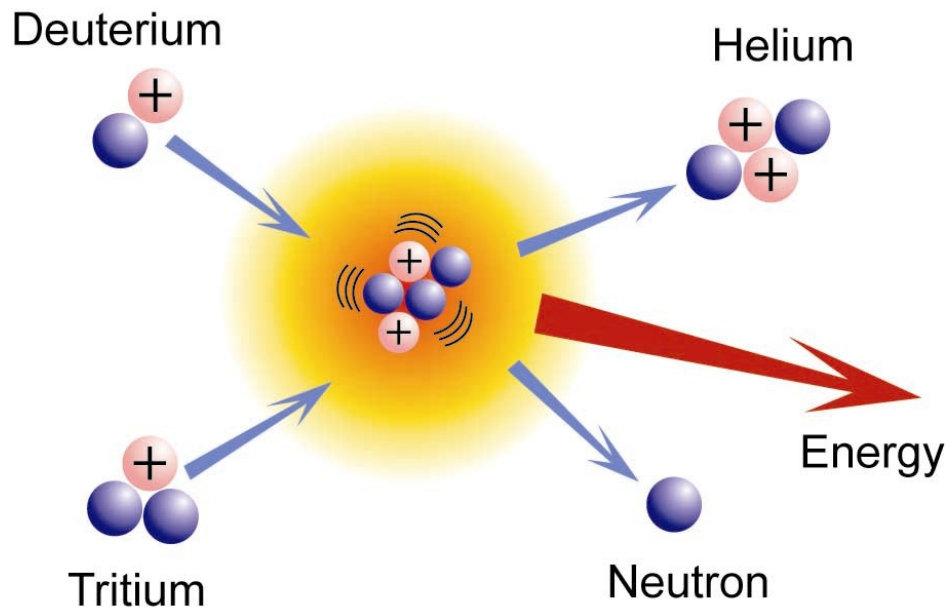


Figura 1.1: Proceso de generación de energía mediante fusión nuclear.

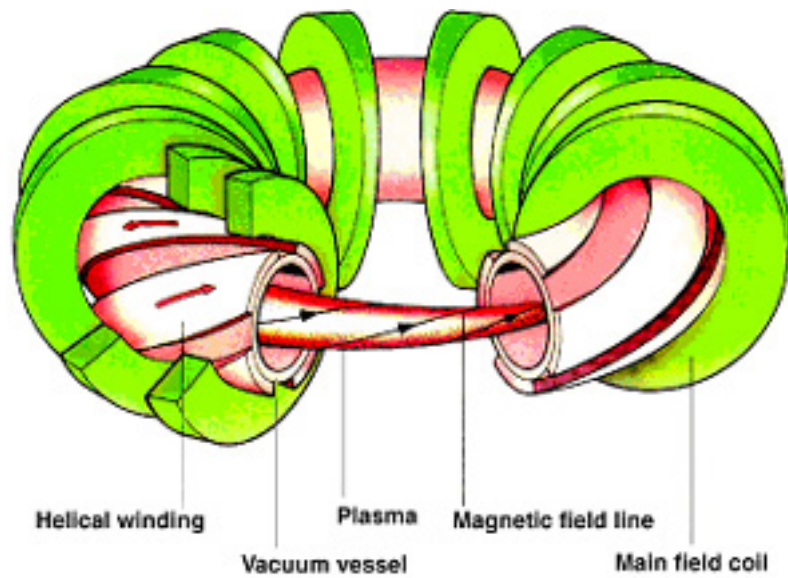


Figura 1.2: Diagrama de un stellarator[4].

### **1.1.3. Diagnóstico de plasma mediante sonda de Langmuir**

Por lo general muchos de los fenómenos que ocurren en el núcleo del plasma en dispositivos de fusión por confinamiento magnético están directamente relacionados con el comportamiento del plasma en su borde[12].

Un hilo conductor se introduce dentro de un plasma y se le aplica un potencial eléctrico para producir una corriente de electrones o iones. Esta corriente es medida y es comparada con el potencial aplicado con lo cual se proporciona la curva característica de la sonda, de la cual se pueden derivar la densidad, potencial y temperatura del plasma [15].

### **1.1.4. Diagnóstico de plasma mediante interferómetro heterodino**

Un interferómetro es un instrumento que emplea la interferencia de ondas electromagnéticas para medir los cambios de fase que ocasiona el plasma sobre una de las ondas. Es posible utilizar los sistemas heterodinos, los cuales corresponden a la generación de nuevas frecuencias a partir de la mezcla de una señal de referencia y una señal de prueba provenientes de fuentes de generación distintas.

La finalidad de la interferometría en plasmas confinados es medir el desfase total asociado a la propagación de una onda en el plasma. Este desfase se relaciona directamente con la densidad electrónica del plasma. La importancia de la densidad del plasma es conocer cuan ionizado se encuentra el gas, pues esto afectará la cantidad y calidad de energía que se produce.

## **1.2. Entorno del proyecto**

### **1.2.1. National Instruments**

National Instruments es una empresa pionera y líder en la tecnología de la instrumentación virtual, un concepto revolucionario que ha cambiado la forma en que ingenieros y científicos abordan las aplicaciones de medición y automatización. Aprovechando el poder de la PC y sus tecnologías relacionadas, la instrumentación virtual aumenta la productividad y reduce los costos por medio de software de fácil integración y hardware modular para adquisición de datos y control de instrumentos[13].

En el año 2011, la empresa inauguró un centro de servicios en Costa Rica, ofreciendo apoyo a sus clientes en toda América, además de proveer equipos y aplicaciones que ayudan a los científicos a innovar en sus áreas.

Uno de los objetivos de la empresa es aumentar la cantidad de personas que utilizan LabVIEW, una de las formas de cumplir con este objetivo es a través de un programa de pasantías en el cual se entrenan a estudiantes para que utilicen en sus proyectos las herramientas de hardware y software de National Instruments, esto beneficia a la empresa dando a conocer sus plataformas de hardware aplicadas en proyectos reales donde se muestran sus ventajas, además, es una forma de distribuir la plataforma de software LabVIEW.

### 1.2.2. Laboratorio de Plasmas y sus Aplicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica

Nace como iniciativa del Dr. Iván Vargas Blanco en el año 2008 mediante un convenio entre el Instituto Tecnológico de Costa Rica y el Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas de España, cuyo fue iniciar la investigación de plasmas en Costa Rica.

Ese mismo año se funda el grupo de investigación en Plasmas y sus aplicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica, con el objetivo de desarrollar y explotar las tecnologías de plasma en Costa Rica, así como contribuir con la investigación en plasmas como futura fuente de energía (investigación en fusión) que se realiza a nivel internacional. Este laboratorio se encuentra localizado en el campus central del Instituto Tecnológico de Costa Rica, ubicado en Cartago.

Al ser un centro multidisciplinario, sus integrantes son estudiantes y profesores de distintas facultades del ITCR, como lo son las Escuela de Física, Escuela de Ingeniería en Electrónica, Escuela de Ingeniería en Mantenimiento Industrial, Escuela de Producción Industrial, Escuela de Ingeniería en Seguridad Laboral e Higiene Ambiental y Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Se cuenta además con la colaboración internacional del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) ubicada en Madrid, España.

### 1.2.3. Impacto de proyecto

El presente proyecto pondrá al Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) como líder centroamericano en la investigación y creación de aplicaciones del plasma, ya que actualmente no existe ninguna empresa o institución en la región que haya incurrido en el área o posea la tecnología que el ITCR dispone para realizar este tipo de investigación.

La necesidad de investigar sobre la fusión nuclear, específicamente en plasma, es de suma importancia ya que se prevee que esta será la única fuente de energía capaz de sustentar a la humanidad en el futuro, por lo que este proyecto contribuye al desarrollo de aplicaciones e investigaciones que contribuyen a ese objetivo común.

El Grupo de Investigación de Plasma del Instituto Tecnológico de Costa Rica, se ha encargado de encabezar la investigación sobre el plasma en nuestro país, siendo uno de sus proyectos destacados “*Diseño y construcción de un stellarator modular pequeño para el confinamiento magnético de plasmas*”. Este proyecto de investigación de desarrollo tecnológico busca implementar un dispositivo de confinamiento magnético de tipo Stellarator modular a pequeña escala para la investigación en plasmas de alta temperatura y baja densidad (SCR-1)[20] .

La investigación de plasmas coloca a Costa Rica entre los países más avanzados en América Latina. Este campo de la física encierra un enorme potencial para generar energía limpia, tratamientos más efectivos y económicos de la basura y una impresionante cantidad de aplicaciones industriales.

## 1.3. Antecedentes del Proyecto

El presente proyecto toma como base las investigaciones anteriores mostradas en [15, 17], las cuales fueron llevadas a cabo por estudiantes pertenecientes en su momento al



grupo de investigación de plasma del ITCR. En las mismas se diseñan los equipos que se utilizarán para diagnosticar el plasma generado con el stellarator SCR-1, una sonda de Langmuir y un Interferómetro Heterodino de Microondas. De estas investigaciones se estudió el principio de operación de ambos sistemas y sus respectivas variables a considerar para el diseño del sistema de adquisición de datos y control de los mismos.

A pesar de que ya se habían diseñado los sistemas de diagnóstico del plasma, estos no se habían podido implementar debido a que no se había diseñado el sistema de adquisición y control antes mencionado, por lo que este proyecto representa la puesta en marcha de las investigaciones mencionadas, además de establecer una referencia para futuros trabajos.

## **1.4. Análisis de la problemática**

### **1.4.1. Descripción del sistema a intervenir**

El sistema consta de una sonda de Langmuir con cuatro electrodos de tungsteno, en los cuales se coloca una tensión y se mide una corriente eléctrica, con estas variables se genera una gráfica corriente vs tensión a partir de la cual se procede a calcular las variables importantes del plasma, principalmente la temperatura y densidad electrónica.

Los niveles de tensión necesarios para una buena caracterización del plasma van desde -70 V a 20 V [9], dicha rampa se hará con un SMU Keithley 2425, para el cual se debe desarrollar un controlador de flujo de datos de manera remota utilizando comunicación serie RS-232.

El sistema de posicionamiento de la sonda dentro de la cámara de reacción es accionado por un motor paso a paso, el cual no cuenta con su respectivo controlador, por lo que este apartado se incluye dentro del presente proyecto.

El interferómetro heterodino de microondas, basa su funcionamiento en la medición de un desfase entre dos señales senoidales generados con osciladores a una frecuencia de 28 GHz. La primera señal llamada señal de referencia pasa directamente a la salida, mientras que la señal restante se hace atravesar el plasma el cual ocasiona un retraso de la misma con respecto a la señal de referencia. Ambas señales son moduladas mediante mezcladores a frecuencias de 1 MHz para su respectivo muestreo, el cual se realizará con una tarjeta de adquisición de datos PCI DAS 4020/12.

### **1.4.2. Descripción general del problema**

A pesar de que el plasma se investiga desde los años 50, en Costa Rica se comenzó a introducir el tema a partir del año 2005 con la incursión del astronauta costarricense Franklin Chan Díaz en el diseño y construcción de un motor de plasma.

En la actualidad se ha realizado muy poca investigación en la ingeniería y física en dispositivos de confinamiento magnético para el estudio del plasma ya que normalmente el diseño y la construcción de estos requiere inversiones cuantiosas que suelen sobrepasar varios millones de euros; también la complejidad de los sistemas requiere la integración de áreas tanto físicas como ingenieriles.

En el Instituto Tecnológico de Costa Rica se creó el grupo de investigación en plasmas, el cual, pretende desarrollar un proyecto que contribuya a la investigación que se lleva

a cabo a nivel mundial en fusión nuclear para demostrar la viabilidad científica tecnológica de los reactores de fusión nuclear como fuente de energía alternativa de energía. Para esto se inició la construcción de un dispositivo de confinamiento magnético tipo stellarator a pequeña escala (SCR-1).

Parte importante del estudio del plasma es la medición de sus parámetros, esto se logra con instrumentación especial, como se mencionó anteriormente se utilizan principalmente la sonda langmuir y el interferómetro heterodino. Esta instrumentación aún no ha sido implementada en el SCR-1, además no se ha diseñado un adecuado procedimiento de adquisición de los niveles de tensión y corriente eléctrica que corresponden a los valores físicos de los parámetros medidos. Estos niveles medidos deben adquirirse de manera precisa para su correspondiente procesamiento, con el fin de representar los valores de temperatura, densidad y potencial del plasma generado.

Al no haber un diseño previo de un sistema de interfaz de adquisición de datos de los diagnósticos del SCR-1, se desconocen las características y especificaciones que dicha interfaz debe cumplir, además que no se han investigado las mejores estrategias de preprocesamiento de la información obtenida de la sonda Langmuir y del interferómetro heterodino de microondas.

No existe tampoco una interfaz que permita la síntesis, visualización e interacción del usuario con los resultados obtenidos del proceso de obtener los parámetros de temperatura y densidad electrónica del plasma.

### **1.4.3. Requerimientos y restricciones de la necesidad**

El sistema requiere de una aplicación en la computadora que permita a los investigadores en plasma visualizar e interactuar con los datos obtenidos de los equipos de diagnóstico del plasma así como también el almacenamiento de dichos datos para su posterior estudio. Se deben de implementar algoritmos de filtrado y procesamiento de los datos para eliminar ruido y realizar los cálculos de las variables físicas deseadas.

Como se mencionó en la sección 1.4.1 la sonda Langmuir carece de un controlador para el motor que posiciona la sonda dentro de la cámara de reacción, dicho controlador debe ser capaz de configurar los pasos y la velocidad del motor para evitar que la cabeza de la sonda colisione con las paredes de la cámara, dañando los electrodos.

En cuanto al interferómetro heterodino, se debe controlar la alimentación de los osciladores, ya que la potencia debe ser tal que las señales puedan ser muestreadas por la tarjeta de adquisición de datos PCI DAS 4020/12 de Measurement Computing, pero evitando que la potencia reflejada en la guía de onda dañe los mismos. En este apartado también se deben filtrar las señales muestreadas para realizar una medida del desfase de manera precisa.

### **1.4.4. Síntesis del problema**

No se cuenta con un sistema de adquisición y procesamiento de datos de referencia para los diagnósticos de plasma del SCR-1.

## **1.5. Meta**

Desarrollar un sistema capaz de medir la temperatura y densidad de partículas ionizadas del plasma generado con el SCR-1 de manera precisa y confiable.

## **1.6. Objetivos**

### **1.6.1. Objetivo general**

Desarrollar una aplicación de referencia para la interacción con los diagnósticos de sonda Langmuir e interferómetro heterodino del SCR-1.

### **1.6.2. Objetivos específicos**

1. Desarrollar una interfaz funcional de adquisición de datos que permita la integración de la sonda de Langmuir y el interferómetro heterodino con una estación de trabajo programable (PC).
2. Identificar los algoritmos de preprocesamiento de datos para la implementación de la sonda de Langmuir y el interferómetro heterodino del SCR-1 a través de la plataforma LabVIEW.
3. Desarrollar una aplicación de software que permita a los usuarios de los diagnósticos una síntesis, visualización e interacción efectiva con los resultados obtenidos de la sonda Langmuir e interferómetro heterodino.

# Capítulo 2

## Marco Teórico

### 2.1. Diagnóstico de temperatura electrónica mediante sonda Langmuir

#### 2.1.1. Concepto de Temperatura Electrónica del Plasma [8]

Un gas en equilibrio térmico tiene partículas a muchas velocidades. La distribución más probable de dichas velocidades se conoce como distribución Maxwelliana, la cuál está dada por

$$f(u) = A \exp(-\frac{1}{2}mu^2/KT) \quad (2.1)$$

donde  $f(u)du$  representa el número de partículas por  $m^3$  con velocidades entre  $u$  y  $u + du$ , el término  $-\frac{1}{2}mu^2$  representa la energía cinética de las partículas y  $K$  es la constante de Boltzmann.

El número de partículas por  $m^3$  o densidad  $n$  está dada por

$$n = \int_{-\infty}^{+\infty} f(u)du \quad (2.2)$$

La constante  $A$  en 2.1 está relacionada con la densidad  $n$  mediante

$$A = n \left( \frac{m}{2\pi KT} \right)^{1/2} \quad (2.3)$$

El ancho de la distribución (ver figura 2.1) está caracterizada por la temperatura  $T$  del plasma.

Para calcular el valor exacto de  $T$ , se calcula el promedio de la energía cinética en la distribución mediante

$$\bar{E} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2}mu^2 f(u)du}{\int_{-\infty}^{+\infty} f(u)du} \quad (2.4)$$

Definimos la velocidad térmica como  $V_{th} = (2KT/m)^{1/2}$  y realizamos el cambio de variable  $y = u/V_{th}$  para resolver las integrales de 2.4 obteniendo  $\bar{E} = \frac{1}{2}KT$  para una dimensión.

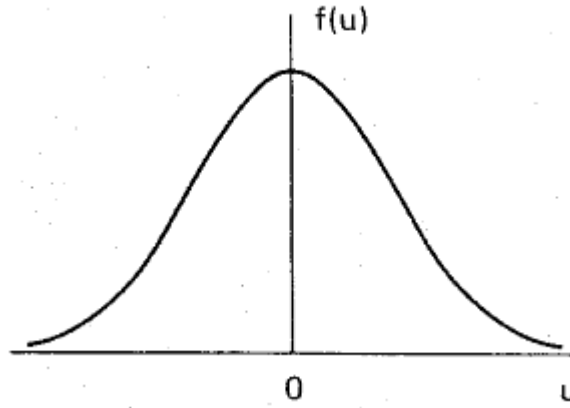


Figura 2.1: Distribución Maxwelliana de velocidad.[8]

Resulta fácil extender el resultado anterior a tres dimensiones, la distribución Maxwelliana es ahora

$$f(x, y, z) = A_3 \exp(-\frac{1}{2}m(x^2+y^2+z^2)/KT) \quad (2.5)$$

donde

$$A_3 = n(\frac{m}{2\pi KT})^{1/2} \quad (2.6)$$

siguiendo el procedimiento anterior obtenemos

$$\bar{E} = \frac{3}{2}KT \quad (2.7)$$

En general la energía cinética promedio es  $\frac{1}{2}KT$  por grado de libertad.

Debido a q  $T$  y  $\bar{E}$  están directamente relacionados por 2.7, se acostumbra en física de plasmas expresar la temperatura en unidades de energía, específicamente en electrón-volt (eV) utilizando el factor de conversión  $1\text{eV} = 11600$  Kelvin.

En el plasma es posible obtener diferentes temperaturas simultáneamente ya que los iones y electrones que componen el plasma tienen distribuciones Maxwellianas separadas con diferentes temperaturas  $T_i$  (temperatura iónica) y  $T_e$  (temperatura electrónica). Esto es debido a que la tasa de colisión ión-ión y electrón-electrón es mayor que la tasa de colisiones entre iones-electrones[8].

La temperatura electrónica del plasma representa la energía cinética promedio de los electrones y la hace una característica colectiva del plasma.

### 2.1.2. Sonda Langmuir

De todas las formas de diagnosticar el plasma, la sonda Langmuir es la más simple, consiste en un pequeño electrodo mecánico que se introduce dentro del plasma. En una configuración de sonda simple, el electrodo se conecta a una fuente de tensión capaz de mantenerlo polarizado a diferentes potenciales positivos y negativos respecto a un potencial de referencia, que generalmente suele ser la cámara de vacío que contiene el plasma. La corriente recogida por la sonda proporciona información sobre la densidad electrónica, la temperatura electrónica y el potencial del plasma con muy buena resolución espacial [18].

### 2.1.3. Curva I - V de la sonda Langmuir

Se define potencial del plasma  $V_{sp}$  como el potencial medido en una posición dada dentro del plasma con respecto a las paredes del dispositivo. El gradiente del potencial del plasma determina el campo eléctrico que energiza los electrones que mantienen la descarga durante la ionización [21].

En un plasma típico, los electrones; debido a que poseen menor masa que los iones, presentan una velocidad térmica mucho mayor, aún cuando ambas partículas se encuentren a la misma temperatura. Aunque el plasma es eléctricamente neutro y las densidades de electrones e iones sean prácticamente iguales, al aplicar un potencial en la sonda  $V_p$ , se atraerá una mayor corriente de electrones, debido a que estos alcanzan la sonda con una velocidad mucho mayor. Como la corriente neta en la sonda debe ser cero, se crea un potencial negativo relativo al plasma llamado potencial flotante  $V_f$ , así se reduce la recolección de electrones y se aumenta la recolección de iones. En este punto el potencial flotante es menor que el potencial del plasma. La figura 2.2 muestra la curva de corriente vs voltaje ideal característica de la sonda langmuir.

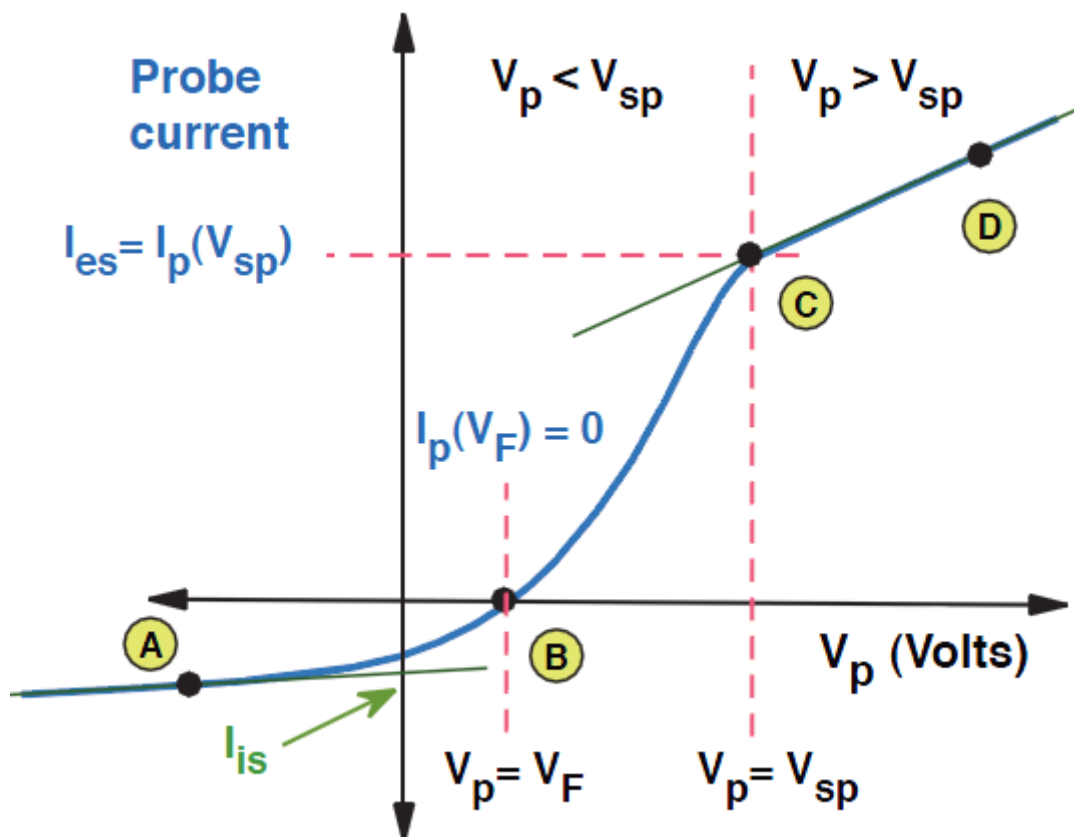


Figura 2.2: Curva IV ideal de la sonda Langmuir[21].

De la curva característica se puede obtener la densidad del plasma  $n$ , la temperatura electrónica  $KT_e$  y el potencial del plasma.

## 2.1.4. Parámetros de la curva característica.

### Región de Transición

Se define como la parte exponencial de la curva I-V (región entre B y C de 2.2) en una gráfica semilogarítmica. Si el plasma sigue una distribución Maxwelliana entonces:

$$I_e = I_{es} \exp[e(V_p - V_{sp})/KT_e] \quad (2.8)$$

donde

$$I_{es} = en_e A \left( \frac{KT_e}{2\pi m} \right)^{1/2} \quad (2.9)$$

siendo A el área expuesta de la punta de la sonda. 2.8 muestra que la pendiente de la curva  $(\ln I) - V_p$  es exactamente  $1/KT_e$ , esto representa una buena medida de la temperatura electrónica[7]. Es conveniente escribir  $KT_e$  como  $T_{eV}$  para indicar que se está obteniendo la temperatura en eV.

### Corriente de Saturación Iónica ( $I_{is}$ )

Punto A de la figura 2.2, en este punto todos los electrones han sido repelidos y existe una saturación de iones. La corriente  $I_{is}$  es mucho menor que la corriente de saturación electrónica, por lo que es mucho más fácil de manejar debido a la baja impedancia que provee. Se podría calcular  $n$  a partir de esta región sin embargo la interpretación de  $I_{is}$  requiere de mayor cálculo y los resultados no son precisos. Una aproximación para el cálculo de  $n$  está dado por:

$$\lambda_D^2 = \epsilon_0 KT_e / ne^2 \quad (2.10)$$

Donde  $\lambda_D$  representa el largo de Debye.

### Potencial Flotante ( $V_f$ )

Punto B de la figura 2.2, se define como el potencial al cual  $I_e = I_i$ , donde  $I_e$  está dada por 2.8 y 2.9.

$$V_f = V_{sp} - \frac{KT_e}{2e} \ln\left(\frac{2M}{\pi m}\right) \quad (2.11)$$

Donde  $M$  es la masa iónica.

### Potencial del Plasma ( $V_{sp}$ )

Punto C de 2.2. Como se mencionó en la sección 2.1.3 es el potencial medido en una posición dada dentro del plasma con respecto a las paredes del dispositivo. De la curva se puede medir trazando un línea recta en el punto de transición hacia la región de saturación de electrones.

## Corriente de Saturación Electrónica ( $I_{es}$ )

El comportamiento exponencial de  $I_e$  con respecto a  $V_p$  continua hasta que  $V_p = V_{sp}$ , en donde ningún electrón es repelido por un potencial negativo, es decir la corriente electrónica se satura. En la curva se puede ver este comportamiento en el punto D de 2.2.

### 2.1.5. Proceso de medición de temperatura electrónica

1. Se parte del circuito mostrado en la figura 2.3, donde  $V_{bias}$  representa a  $V_p$ , mientras que la resistencia  $R$  se coloca para medir indirectamente la corriente  $I_p$ .
2. Se hace un barrido de  $V_p$  desde -60 V a 10 V y se mide la corriente de la sonda.
3. Se le debe restar a  $I_p$  la corriente de saturación iónica para continuar con el análisis.
4. Se gráfica en escala semilogarítmica la corriente de electrones.
5. Se obtiene el valor de la temperatura electrónica leyendo el valor de la pendiente de la curva IV. La figura 2.4 muestra un ejemplo de como medir la temperatura electrónica a partir de la curva.

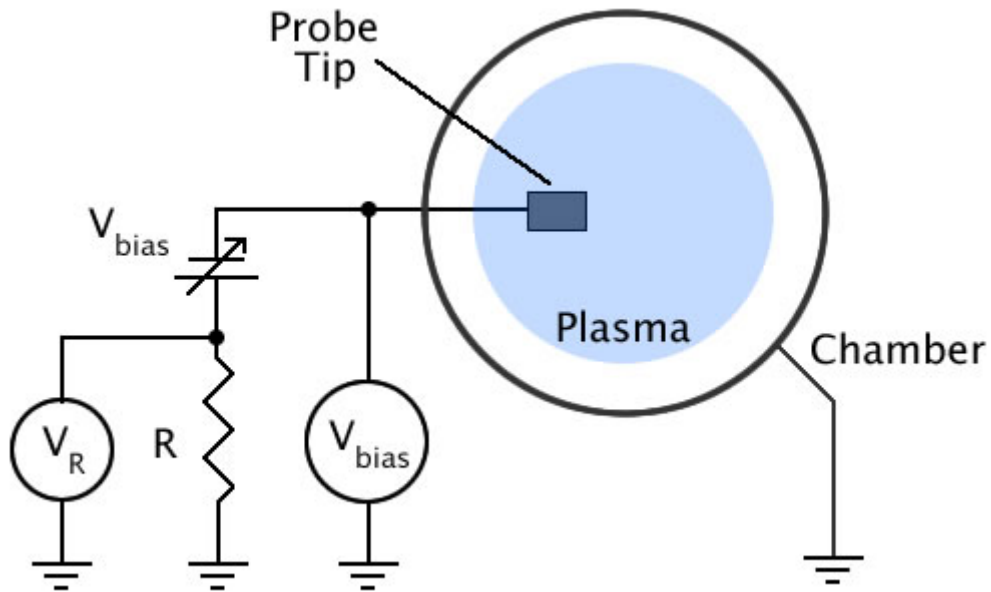


Figura 2.3: Diagrama de conexión de la sonda Langmuir.[9]

### 2.1.6. Proceso de medición de densidad electrónica

Una vez que se calcula la temperatura electrónica y la corriente de saturación del plasma, la densidad electrónica se obtiene mediante un despeje algebraico de las ecuaciones 2.8, 2.9 y 2.11, de donde se obtiene la ecuación 2.12.

$$n = \frac{I_{sat}}{qAs \exp(-1/2)} \sqrt[2]{M/qTe} \quad (2.12)$$



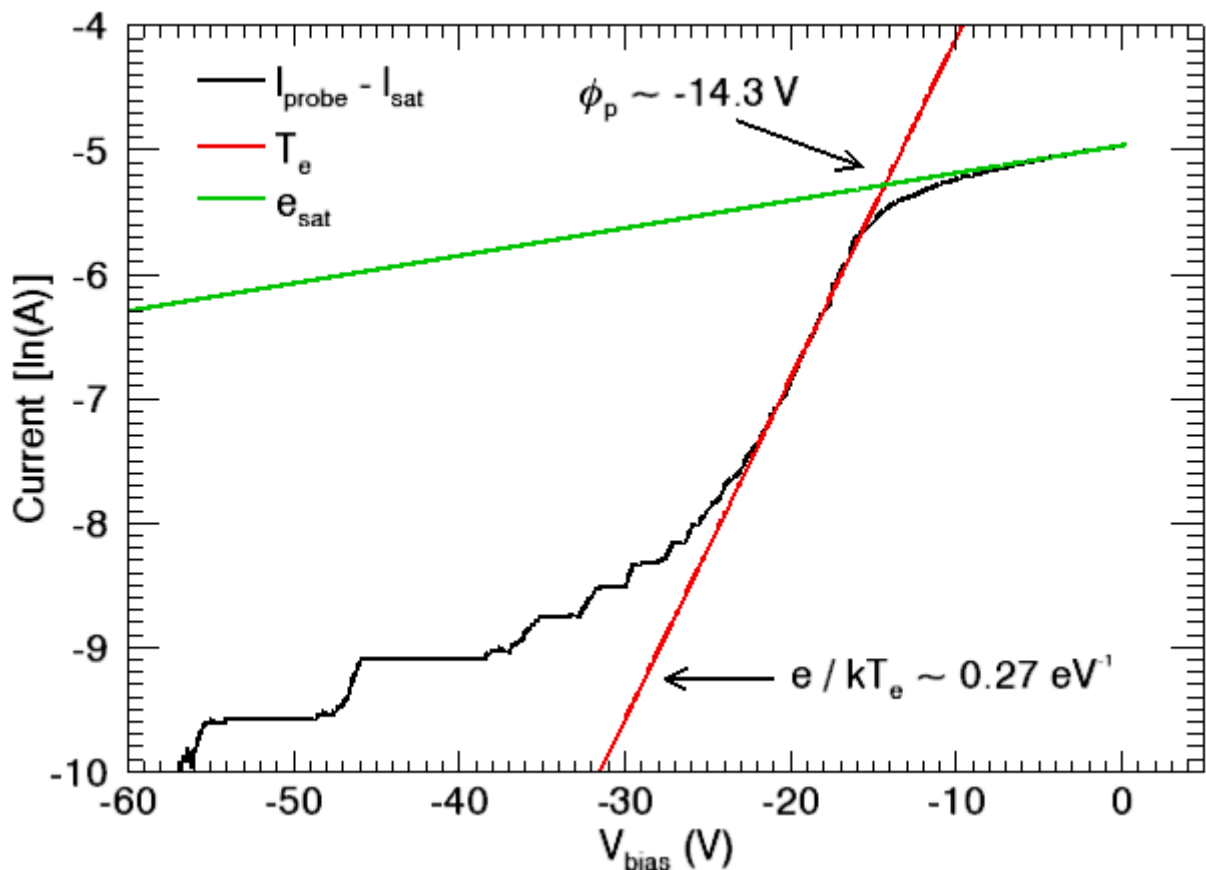


Figura 2.4: Medición de temperatura electrónica a partir de la curva IV.[9]

## 2.2. Diagnóstico del plasma mediante interferómetro heterodino

### 2.2.1. Densidad Electrónica del Plasma

Como se mencionó en la sección 2.1.1, densidad electrónica es la cantidad de electrones por  $m^3$  presentes en el plasma. Se relaciona directamente con la frecuencia del plasma, el cuál es un parámetro importante a considerar a la hora de seleccionar la frecuencia a la cuál se hará el diagnóstico por interferómetro de microondas.

### 2.2.2. Interferómetro Heterodino de Microondas

La interferometría de microondas es una técnica para medir la densidad electrónica del plasma. El principio de funcionamiento está basado en cambio de fase que sufre una microonda linealmente polarizada cuando atraviesa una columna de plasma [11]. El cambio de fase es proporcional a la densidad a lo largo del camino que sigue el haz de microondas.

Este tipo de dispositivos constan de dos fuentes de microondas, una para el haz principal y la otra para el oscilador local. Las frecuencias de operación son valores fijos que van desde los 60 GHz hasta los 300 GHz. Existe una pequeña diferencia en frecuencia,  $\Delta\omega$  la cual se define como la frecuencia intermedia entre el haz principal y el oscilador local. La figura 2.5 muestra el diagrama general de un interferómetro de microondas.

Como se muestra en la figura 2.5 los dos haces se mezclan en el mezclador de referencia, en este punto la señal es

$$V_1(t) = \sin(\Delta\omega t) \quad (2.13)$$

Después de cruzar el plasma, el haz principal sufre un cambio de fase  $\Delta\phi_p$  que es proporcional a la densidad electrónica del plasma.

$$\Delta\phi_p(t) = 2,82 \cdot 10^{-15} \lambda \int_{z_1}^{z_2} n(z, t) dz \quad (2.14)$$

donde  $z_1$  y  $z_2$  son las coordenadas de los puntos de entrada y salida del haz en el plasma,  $n(z, t)$  representa la densidad electrónica y  $\lambda$  en la longitud de onda en vacío.

En el mezclador de plasma (figura 2.5) la señal es

$$V_2(t) = \sin(\Delta\omega t - \Delta\phi_p(t) - \phi_0) \quad (2.15)$$

Existe una diferencia de fase  $\phi_0$  debido a la diferencia de las guías de onda entre mezcladores y fuentes.

$\Delta\phi_p(t)$  genera un retraso temporal de  $V_2$  con respecto a la referencia  $V_1$  como se muestra en la figura 2.6, este retraso desaparece cuando la descarga de plasma termina.

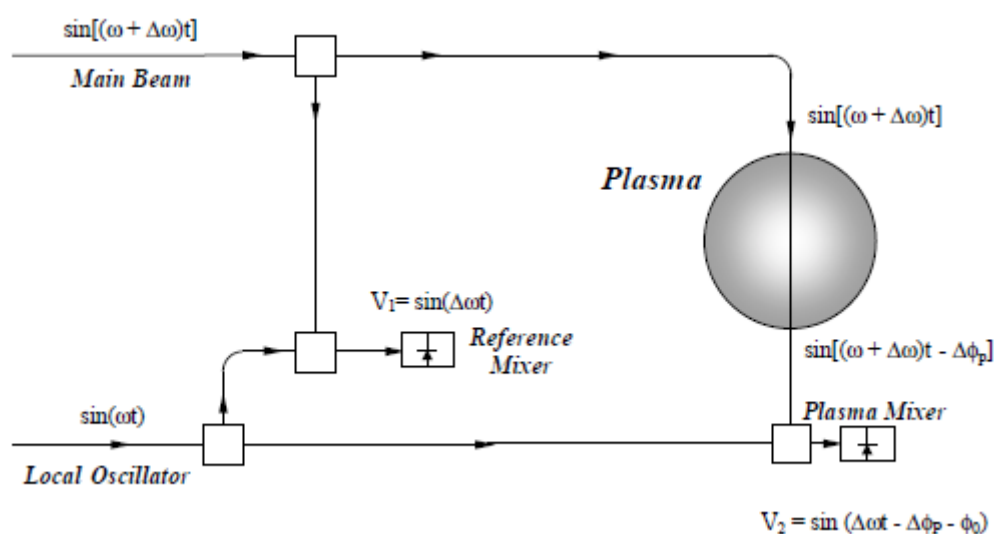


Figura 2.5: Diagrama conexión general de un interferómetro de microondas.[11]

La densidad del plasma produce un cambio de fase, el cuál se presenta como un retraso temporal entre dos señales sinusoidales.

### 2.2.3. Métodos de detección del cambio de fase.

Existen muchos métodos para medir el desfase  $\Delta\phi_p$  generado por el plasma. Uno de ellos se basa en medir el retardo temporal mediante la detección de cruces por cero de las señales de referencia y plasma,  $V_1$  y  $V_2$  respectivamente.

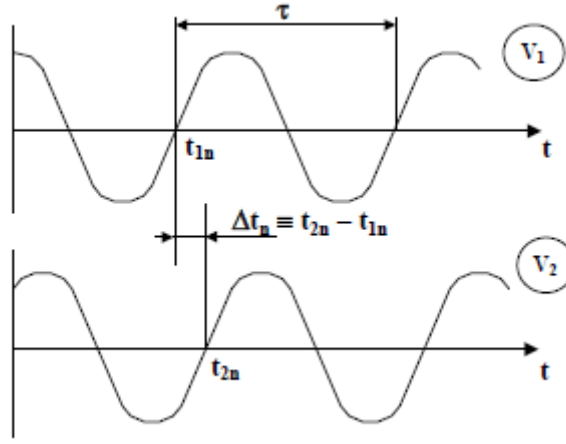


Figura 2.6: Retraso en el tiempo generado por  $\Delta\phi_p$  en la señal  $V_2$  con respecto a  $V_1$ . [11]

El análisis se basa midiendo los cruces por cero con pendiente positiva,  $t_{1n}$  y  $t_{2n}$  de la figura 2.6, entonces

$$(\Delta\omega)t_{1n} = 2n\pi \rightarrow t_{1n} = \frac{2n\pi}{\Delta\omega} n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.16)$$

$$(\Delta\omega)t_{2n} - \Delta\phi_p - \phi_0 = 2n\pi \rightarrow t_{2n} = \frac{2n\pi + \Delta\phi_p + \phi_0}{\Delta\omega} \quad (2.17)$$

$$\Delta t_n \equiv t_{2n} - t_{1n} = \frac{\Delta\phi_p + \phi_0}{\Delta\omega} \quad (2.18)$$

La ecuación 2.18 es muy importante ya que es la que relaciona el intervalo de tiempo entre cruces por cero con el cambio de fase [11].

Este método presenta dos ventajas importantes:

- Los cambios en la amplitud de la señal producidos por fenómenos de refracción y absorción no tienen influencia en el resultado.
- No existe ambigüedad de interpretación en los puntos máximos y mínimos de las señales.

Otra técnica muy común utilizada en interferómetros de microondas es barrer la frecuencia de la fuente que la genera, luego, si uno de los brazos es más largo que el otro, las frecuencias de las ondas cuando interfieran serán diferentes

$$\Delta\omega = \frac{d\omega}{dt} \cdot \frac{L}{V_p} \quad (2.19)$$

donde  $\frac{d\omega}{dt}$  es la velocidad de barrido,  $L$  es la diferencia de longitudes entre brazos y  $V_p$  es la velocidad de la fase de radiación en el interferómetro [17].

## 2.2.4. Frecuencia de Operación

De [8] podemos definir la frecuencia del plasma como la frecuencia a la que oscila un electrón alrededor de su punto de equilibrio, al ser desplazado de su posición dentro de la estructura de iones del plasma.

Se debe seleccionar la frecuencia de medida significativamente mayor que la máxima frecuencia esperada del plasma, ya que si esto no sucede las microondas generadas por la fuente del interferómetro no penetrarían el plasma de manera que no se podría medir el desfase con respecto a la señal de referencia.

Otro parámetro importante derivado de la frecuencia de operación es la frecuencia de muestreo a la que debe operar el circuito con el cual adquirimos los datos, esta frecuencia de muestreo debe cumplir con el teorema de Nyquist.

*"Una señal analógica puede ser reconstruída, sin error, de muestras tomadas en iguales intervalos de tiempo. La razón de muestreo debe ser igual, o mayor, al doble de su ancho de banda de la señal analógica"[10].*

## 2.3. Stellarator SCR-1

El SCR-1 es un dispositivo de confinamiento magnético tipo stellarator [5], de bajo costo y pequeña escala con el fin de experimentar y estudiar el plasma. Los resultados obtenidos son aplicables en el desarrollo de tecnologías de fusión y física de plasmas.

### 2.3.1. Historia y Objetivos

El proyecto inició en octubre del 2008, como iniciativa del Grupo de Plasmas del ITCR [20] mediante un convenio entre el Instituto Tecnológico de Costa Rica y el CIEMAT, con el objetivo principal de involucrar a Costa Rica en el programa internacional de investigación del plasma. También se pretende el desarrollo de proyectos con gran participación estudiantil que contribuyan a los esfuerzos internacionales por lograr que la fusión nuclear se convierta en un fuente energética viable y sostenible.

### 2.3.2. Especificaciones del SCR-1

El cuadro 2.1 presenta las especificaciones más importantes del stellarator SCR-1.

### 2.3.3. Diagnósticos del stellarator SCR-1

#### Sonda Langmuir

Esta sonda cuenta con cuatro electrodos con los cuales se puede medir una variable distinta por electrodo, lo que da la posibilidad de medir el potencial flotante en dos puntos distintos y poder deducir las medidas directas de otras magnitudes.

El sistema de posicionamiento en vacío cuenta con un motor paso a paso SLO-SYN KML062S04, el cual permite la facilidad de movimiento de la sonda entre descarga y descarga. La sonda se encontrará fija a la hora de medir.

Tabla 2.1: Especificaciones del SCR-1[15]

ESPECIFICACIÓN	SÍMBOLO	DETALLE
Potencia nominal de calentamiento	$Q_{ECRH}$	5.0 kW
Radio mayor	R	0.238 m
Número de periodos	m	2
Radio menor del plasma	$a_p$	0.0422 m
Transformada rotacional		0.3
Radio sección transversal de la máquina	r	0.114 m
Corriente eléctrica nominal por vuelta	I	1088 A
Corriente eléctrica nominal por bobina		8704 A
Numero de vueltas por bobina	N	8
Fuente de alimentación de la bobinas		4 Baterías DC
Número de bobinas		12
Estructura del bobinado		Doble pancake
Frecuencia de calentamiento: Primer armónico	$f_1$	2.45 GHz
Material de la cámara de vacío		Acero Inoxidable
Frecuencia de calentamiento: segundo armónico	$f_2$	4.91GHz
Campo magnético resonante	B	0.0878 T
Temperatura electrónica de plasmas	$T_e$	15 eV
Temperatura electrónica de plasmas	$T_e$	180000 °C
Tiempo de confinamiento de la energía	$t_E$	$7.30 \times 10^{-4}$ ms
Volumen de plasmas	$V_p$	8 litros
Longitud de pulso	t	4 s
Presión interna en la cámara de vacío	P(torr)	$3.75 \times 10^{-9}$
Bomba mecánica		Scroll, $4.8 \frac{m^3}{h}$
Bomba Turbo		Turbo 220 L/s
Tipos de bobinas		Modulares

La cabeza de la sonda es de Nitruro de Boro y una matriz de cuatro puntas de tungsteno[20].

La figura 2.7 muestra el diagrama de la sonda Langmuir del SCR-1.

### Interferómetro heterodino de microondas

Este interferómetro opera a una frecuencia de 28 GHz lo que corresponde a una longitud de onda de 10.71 mm, sigue la configuración y principio de operación explicado en la sección 2.2.2.

Cuenta con una tarjeta de adquisición de datos PCI DAS 4020 de Measurement Computing, la cuál mediante la librería llamada ULx, permite ser controlada desde LabVIEW. La velocidad de muestreo de la tarjeta es de 25MHz, lo que permite adquirir de manera fiable los datos del interferómetro.

La figura 2.8 muestra el diagrama de conexión del interferómetro.

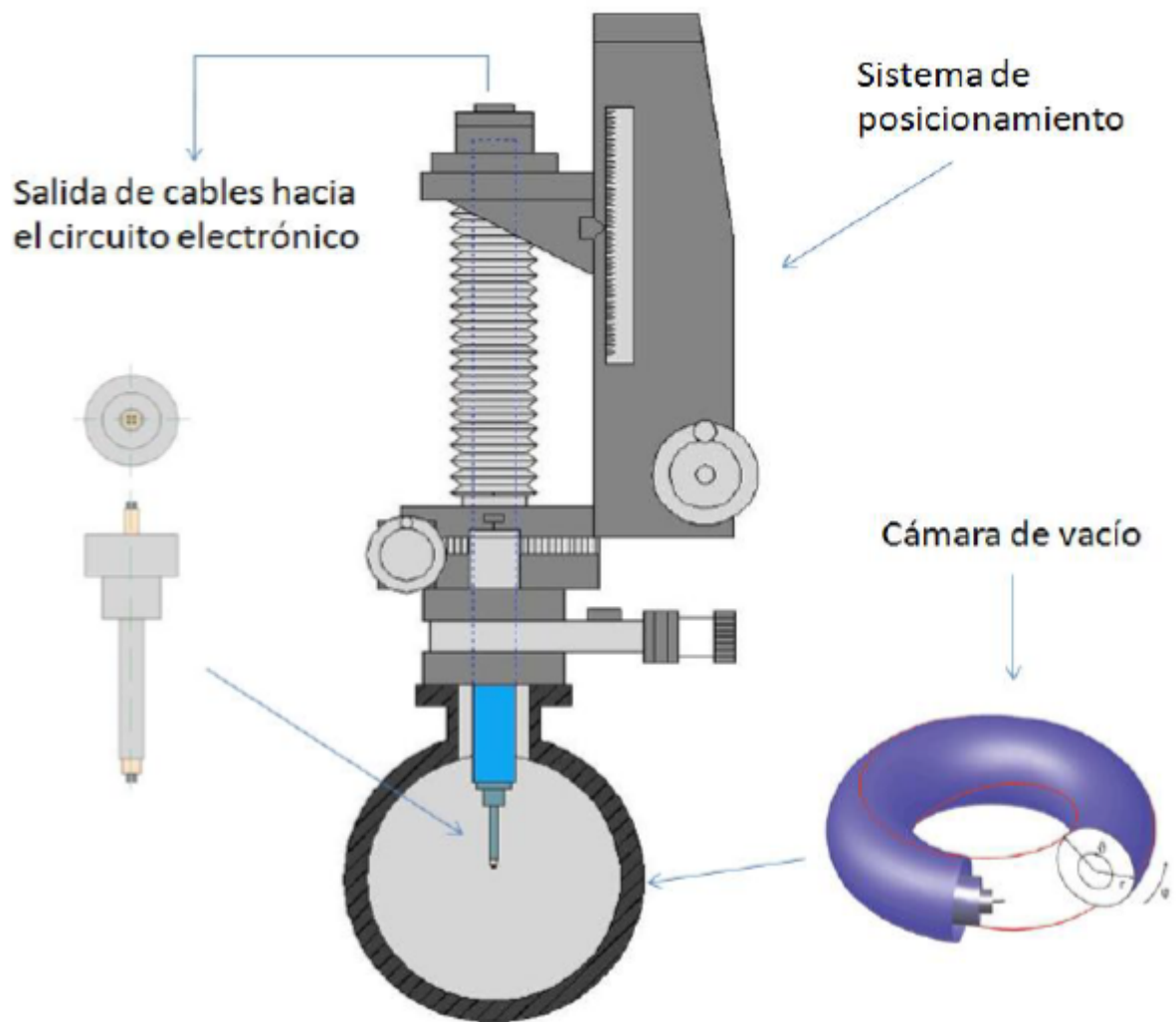


Figura 2.7: Sonda Langmuir del SCR-1[15].

## 2.4. Instrumentación Virtual : LabVIEW

El principio de la instrumentación virtual es aprovechar la PC o computadora personal para evitar la duplicar componentes, dando a los usuarios un motor más potente, costos más bajos y la solución más flexible.

La esencia de la instrumentación virtual es la constatación de que la funcionalidad del equipo en los dispositivos también está disponible en PC's estándar, con la diferencia que es más potente y de menor costo.

En 1986, National Instruments presentó LabVIEW e introdujo la instrumentación virtual como principio fundamental del software.

LabVIEW originalmente se enfocó en aplicaciones de adquisición de datos y control de instrumentos, y el cambio en las tecnologías del bus de E/S ha sido una fuerza impulsora en el desarrollo de la plataforma. LabVIEW ayuda a los usuarios a adquirir continuamente y analizar datos de millones de canales de E/S e instrumentos[14].

LabVIEW es compatible con las herramientas de control de instrumentos GPIB y RS232, USB, Bluetooth, PCI y PCI Express, PXI y PXI Express, inalámbrico y E/S basadas en Ethernet para cientos de diferentes formas, niveles de desempeño, y opciones ambientales.

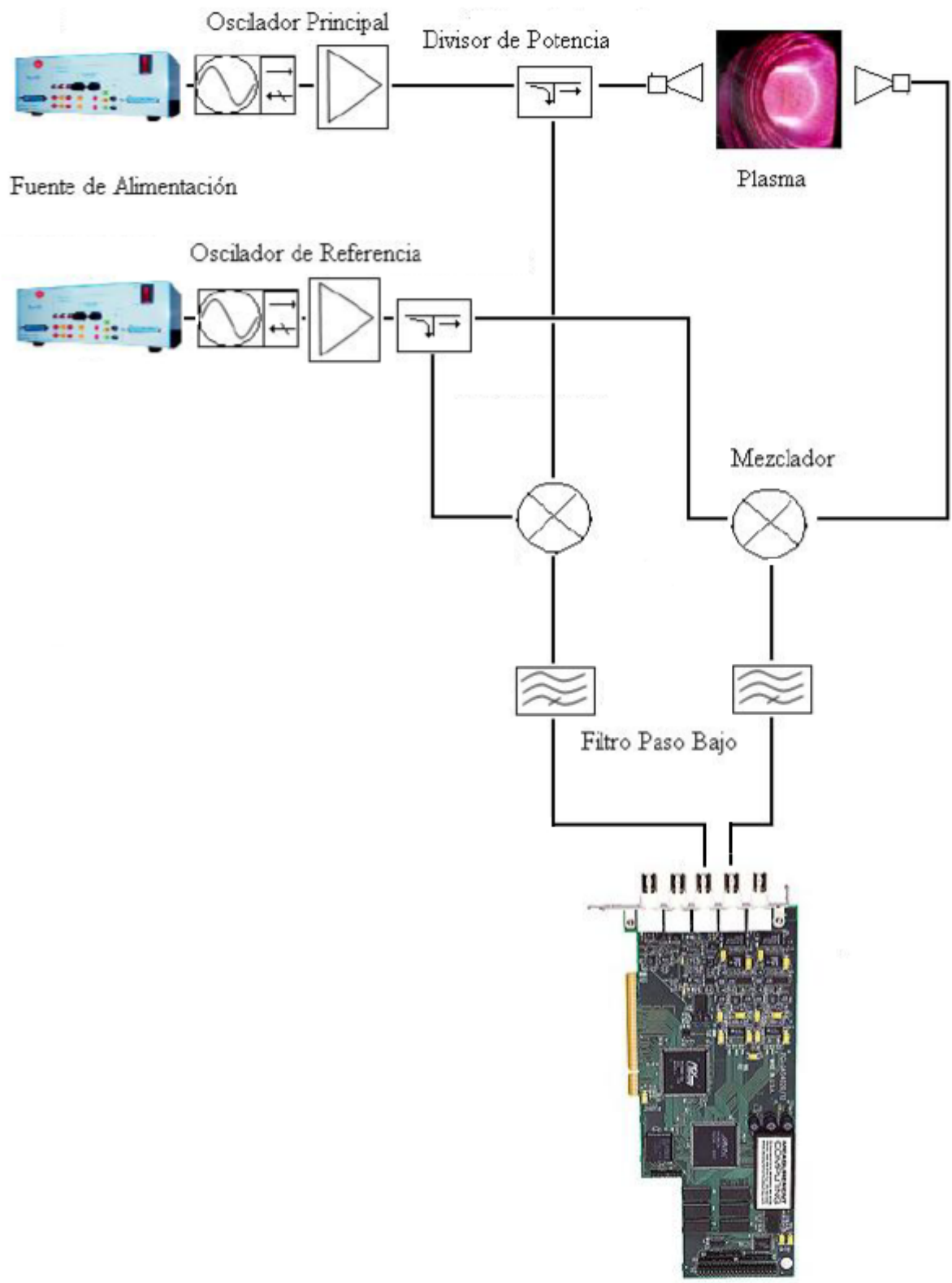


Figura 2.8: Interferómetro de Microondas para el SCR-1[17].

# Capítulo 3

## Procedimiento metodológico

El proceso para cumplir los objetivos del presente proyecto se dividió en 5 etapas principales las cuales se describen a continuación:

### 3.1. Etapas de desarrollo

#### 3.1.1. Entrenamientos y revisión bibliográfica

En esta etapa la empresa *National Instruments* colaboró con los entrenamientos requeridos para utilizar sus plataformas de hardware y software, Compact RIO y LabVIEW respectivamente. Los cursos que se tomaron fueron: LabVIEW Core 1, 2 y 3, Adquisición de Datos y Acondicionamiento de Señal, Adquisición de Datos Avanzado, LabVIEW Tiempo Real 1 y 2 y LabVIEW FPGA. EL contenido de dichos cursos abarca conocimientos que van desde los primeros pasos de programación en LabVIEW hasta la implementación y control de sistemas de tiempo real y programación de FPGA, lo cual se adecúa a las características del presente proyecto.

De manera simultánea se realizó una revisión bibliográfica con la finalidad de conocer a fondo el principio de operación de la sonda Langmuir y el interferómetro heterodino, además de sus características más importantes y otros conceptos relevantes. Principalmente se buscó conocer los parámetros de salida de los transductores y sus respectivos niveles de tensión y corriente, esto último con la finalidad de realizar el diseño de instrumentación pertinente.

#### 3.1.2. Requerimientos de hardware

##### Hardware para sonda Langmuir

De acuerdo a las características estudiadas previamente de la sonda de Langmuir y del interferómetro heterodino se procedió con la propuesta de hardware a utilizar en el sistema. Primeramente se determinaron todas las variables del proceso de diagnóstico mediante sonda Langmuir y se dividieron en variables de salida o de entradas, esto sirvió como primer filtro en la búsqueda de los módulos respectivos, seguidamente se revisaron los niveles de tensión y corriente de los módulos y se seleccionaron los que se adaptan mejor a las características de los transductores.



## **Hardware para interferómetro heterodino**

En cuanto al interferómetro heterodino ya se cuenta con una tarjeta de adquisición de datos PCI DAS 4020/12 de Measurement Computing, la cual cuenta con una biblioteca en LabVIEW con la que se controlará la adquisición de datos de la misma. Se utilizará dicha tarjeta ya que la frecuencia de muestreo es de 25 MHz

### **3.1.3. Ensamble de la sonda Langmuir**

En esta etapa del proyecto se contó con la ayuda del Dr. Celso Ribeiro profesor e investigador del laboratorio de plasmas. Se realizó el procedimiento de ensamble de la sonda diseñada en [15] y su montaje en la cámara de prueba.

### **3.1.4. Ensamble del interferómetro heterodino de microondas**

Con la ayuda del Dr. Iván Vargas y el Ing. José Mario Carranza se implemento el interferómetro en la cámara de pruebas además se calibró el mismo de manera que en ausencia de plasma el desfase entre las señales fuera cero y por consiguiente la densidad electrónica fuera también cero.

### **3.1.5. Diseño e implementación del sistema de adquisición y su interfaz en el computador**

En esta etapa se diseñó el sistema de adquisición de datos de la sonda langmuir y del interferómetro heterodino, para lo cual se tomaron en consideración los requerimientos de hardware estudiados previamente. También se diseñaron e implementaron los algoritmos requeridos para el procesamiento de los datos y su respectiva visualización y control a través de una interfaz en la PC

## **3.2. Solución final**

El proyecto se desarrollará utilizando hardware y software de la empresa National Instruments, específicamente se empleará la plataforma de LabVIEW 2012 y el sistema empotrado NI Compact RIO.

LabVIEW es un potente software de diseño de sistemas construido específicamente para tareas realizadas por ingenieros y científicos. Está capacitado para enfrentar la próxima generación de desarrollo de software y es utilizado por una variedad de compañías, las cuales han transformado su trabajo al adoptarlo.

Debido a su extenso entorno de desarrollo brinda a científicos e ingenieros una integración con hardware sin precedentes y amplia compatibilidad, inspira a resolver problemas, acelera su productividad y le da la seguridad para innovar continuamente para crear y desplegar sistemas de medidas y control [2]. Además LabVIEW es el único entorno de programación gráfica con bibliotecas integradas y específicas para ingeniería de funciones de software e interfaces de hardware y características para análisis, visualización y compartir datos.



Figura 3.1: Componentes del sistema empotrado cRIO[1].

Debido a las especificaciones anteriores se utilizará LabVIEW para el control del sistema global de adquisición de los datos de la sonda langmuir y el interferómetro heterodino, además al ser un entorno gráfico, facilita el diseño del HMI (Human Machine Interface), para lograr una interfaz con el usuario amigable y sencilla de usar.

En cuanto al hardware se refiere, para el sistema de adquisición de datos de la sonda Langmuir, se utilizará la plataforma Compact RIO (cRIO), el cual es un sistema reconfigurable y embebido de control y adquisición de datos. La arquitectura del cRIO consiste en un controlador embebido para comunicación y procesamiento, un chasis reconfigurable que aloja la FPGA programable por el usuario, módulos de entrada o salida intercambiables al momento (ver figura 3.1) y software gráfico LabVIEW para rápida programación en tiempo real, Windows y FPGA[1]. Esta plataforma ofrece una gran versatilidad debido a la amplia gama de rangos y tipos de mediciones que se pueden llevar a cabo con los módulos.

El interferómetro heterodino de microondas del SCR-1 ya cuenta con una tarjeta de adquisición de datos, la cual se instalará en un computador y se comunicará con LabVIEW aprovechando las grandes capacidades de integración con hardware que este último posee.

### 3.3. Diseño Experimental

Para comprobar el funcionamiento adecuado del sistema se replicó el experimento mostrado en [9], el cual muestra la forma correcta de implementar una sonda de Langmuir y calcular la densidad y temperatura electrónica.

En cuanto al interferómetro heterodino se cuenta con el programa de adquisición y cálculo de densidad electrónica del interferómetro del stellarator TJ-II proporcionado por el Ing. José Mario Carranza, quien hizo su proyecto de graduación con dicho equipo. Por lo tanto se compararon los resultados obtenidos con dicho programa con los obtenidos con el sistema diseñado en el presente proyecto.

# Capítulo 4

## Sistema de adquisición y procesamiento de los diagnósticos del plasma del SCR-1: sonda Langmuir e interferómetro heterodino.

### 4.1. Descripción general de sistema implementado

#### 4.1.1. Descripción a nivel de hardware

Como se mencionó en apartados anteriores, para la implementación del sistema se utilizó la plataforma cRIO de NI, esta consiste en un controlador en tiempo real y un chassis con una FPGA empotrada, todo lo anterior con los respectivos módulos de entradas y salidas. Este sistema se comunica con un computador (PC) en la cual se programó la interfaz de usuario. En esta PC se ejecutan los algoritmos de procesamiento de datos para el cálculo de la temperatura y densidad electrónica, potencial flotante y potencial del plasma, además se encarga también de la adquisición y procesamiento de datos obtenidos del interferómetro heterodino de microondas. Dichos algoritmos se implementaron utilizando la plataforma LabVIEW.

El controlador de tiempo real se encarga de la adquisición de los datos obtenidos de la sonda Langmuir, a través del sistema de medición Keithley 2425. Finalmente para el control del posicionamiento de la sonda dentro de la cámara se utiliza un motor paso a paso, el cual es controlado desde la FPGA del sistema cRIO. La figura 4.1 muestra el diagrama de bloques del sistema.

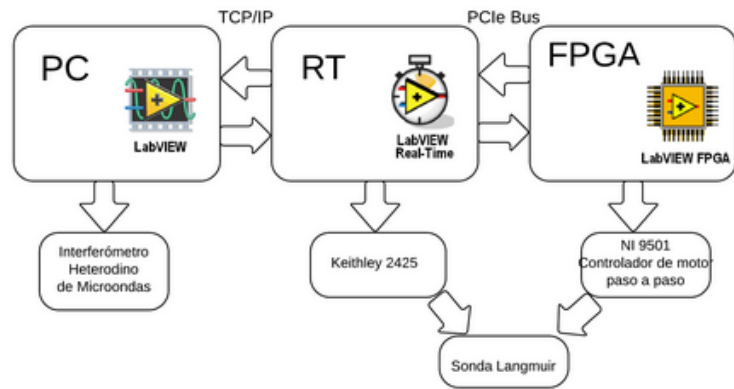


Figura 4.1: Diagrama de bloques del sistema

#### 4.1.2. Descripción a nivel de software

La implementación de los algoritmos se realizó con la plataforma LabVIEW 2012, en la cual se controla el proceso adquisición y procesamiento de los datos obtenidos de la sonda de Langmuir e interferómetro heterodino así como su respectivo procesamiento para calcular los valores de temperatura y densidad electrónica del plasma. Se encarga también del respectivo almacenamiento de los datos en el computador para un posterior análisis de los mismos. Este control consiste en una arquitectura de máquina de estados la cual sigue el diagrama mostrado en la figura 4.2. Este proyecto se complementa con [16], el cuál se encarga del proceso de generación de plasma representado en el estado respectivo en la figura 4.2.

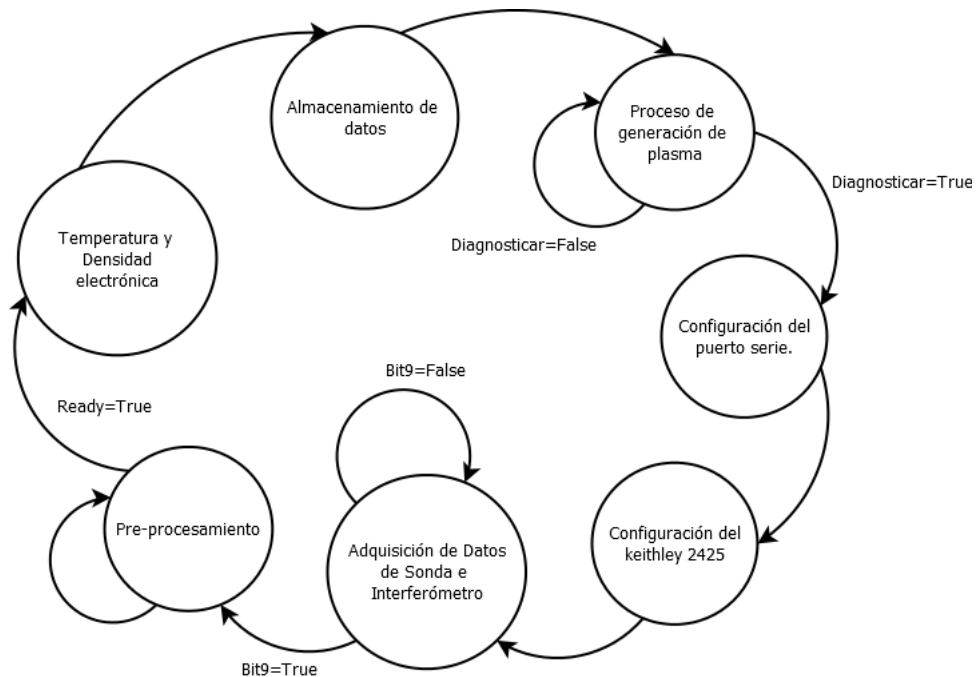


Figura 4.2: Diagrama de estados general del sistema.

## 4.2. Descripción detallada de la organización del hardware utilizado

Primeramente en el computador se instaló la tarjeta de adquisición de datos PCI DAS 4020/12 mostrada en la figura 4.3, la cual se utilizó para muestrear las señales generadas por el interferómetro heterodino de microondas para su respectivo procesamiento. Las entradas de la tarjeta de adquisición se conectan a los mezcladores del interferómetro tal y como se muestra en la figura 2.8.



Figura 4.3: Tarjeta de adquisición de datos PCI DAS 4020/12 de Measurement Computing.

El control de adquisición de los datos obtenidos de la sonda Langmuir se lleva a cabo con el sistema cRIO, en el cuál consta de un chasis en el cual se integra la FPGA y en el modelo utilizado para este proyecto, NI cRIO 9074 mostrado en la figura 4.4, se integra también el controlador RT. Los módulos de adquisición de datos utilizados son el NI 9870 y el NI 9501 mostrados en la figura 4.5, encargados de la comunicación serie RS 232 y del control del motor respectivamente. El sistema se comunica con el computador a través del protocolo de comunicación TCP/IP (Ethernet) para el procesamiento y visualización de los datos de la sonda Langmuir e integrar estos con el sistema de adquisición de datos del interferómetro heterodino.



Figura 4.4: Sistema cRIO utilizado para la adquisición de datos de la sonda Langmuir.



Figura 4.5: Módulos NI 9870 y NI 9501 utilizados en el sistema de adquisición de datos de la sonda Langmuir.

La sonda Langmuir para el SCR-1 consta de ocho electrodos de tungsteno a los cuales se les aplica una tensión eléctrica para capturar las partículas ionizadas en el plasma. La variable a medir es una corriente eléctrica, con la cual se procede a generar una curva corriente vs voltaje para determinar los parámetros importantes. Los electrodos tienen una longitud de exposición de 3 mm para regular la cantidad de electrones capturados. La conexión eléctrica se realiza a través de ocho hilos conductores de cobre separados 5mm entre sí con el fin de eliminar las capacitancias parásitas y disminuir la interferencia que cada hilo conductor pueda generar a otro adyacente. La configuración de los electrodos permite la implementación del método de la sonda tripe detallado en [15].

La figura 4.6 muestra las partes internas principales de la sonda Langmuir del SCR-1.

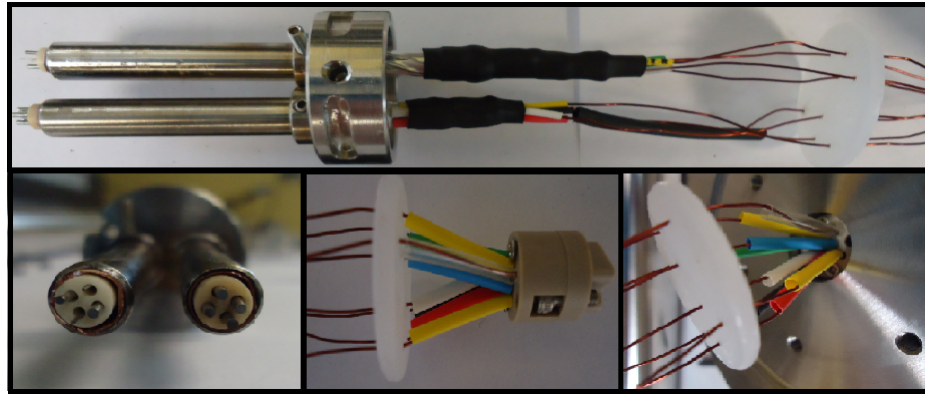


Figura 4.6: Partes de la sonda de Langmuir del SCR-1.

Debido a los niveles de corriente del plasma tan bajos; los cuales oscilan hasta los cientos de microamperios, que se obtienen a través de la sonda, se optó por utilizar el sistema de medición Keithley 2425; mostrado en la figura 4.7, ya que este ofrece rangos de medición hasta 10  $\mu\text{A}$ , lo que lo hace el instrumento adecuado para monitorear y registrar dicha corriente, también permite la generación de rampas de voltaje dentro de los rangos requeridos para una buena caracterización del plasma, llamado voltaje de polarización, el cual generalmente va desde los -50 V a 10V.

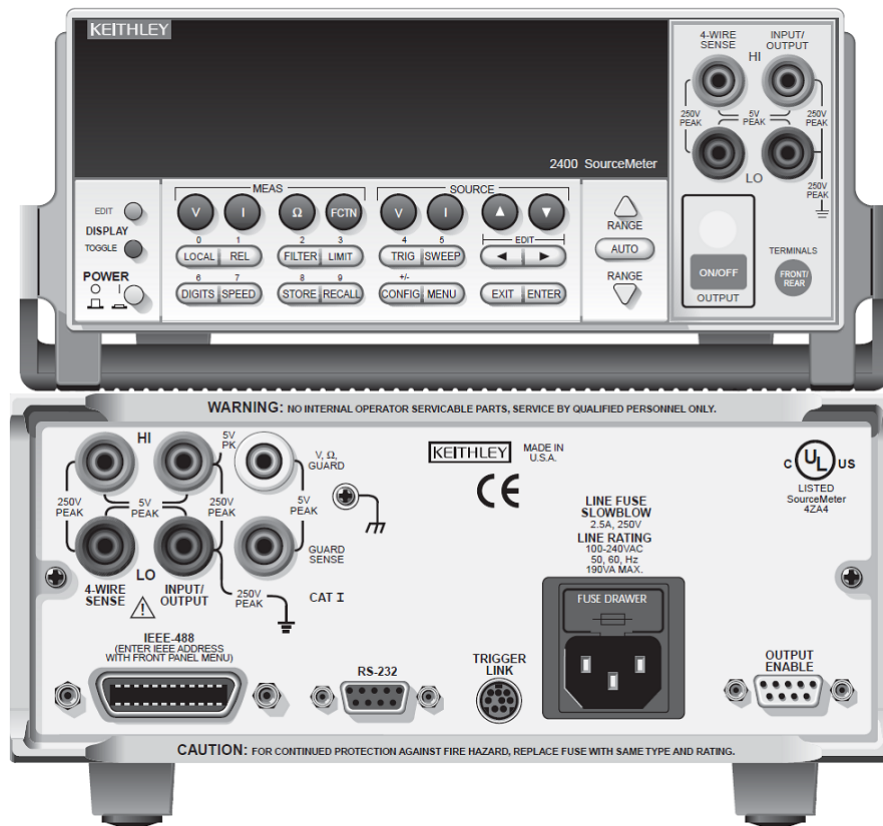


Figura 4.7: Keithley 2425 (Parte frontal y trasera).

Utilizando este instrumento se simplificó el circuito mostrado en la figura 2.3, ya que se puede prescindir del método indirecto de medir la corriente a través de la resistencia y la fuente variable de tensión, debido a la capacidad del Keithley 2425 de actuar como generador y medidor simultáneamente. En la figura 4.8 se muestra el diagrama del nuevo circuito implementado.

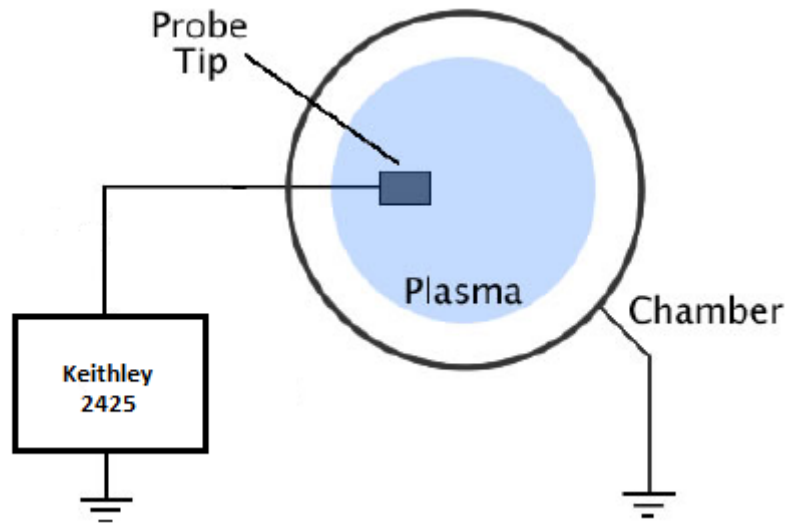


Figura 4.8: Circuito de medición del voltaje de polarización y corriente de la sonda.

La principal ventaja de utilizar el Keithley 2425, es su capacidad de ser operado de manera remota. Específicamente, esto se logra a través de dos interfaces de comunicación: GPIB utilizando el estándar IEEE 488.2, o la interfaz de comunicación serial RS 232. Para el caso del presente proyecto se utilizó la comunicación serie, esto debido principalmente a la facilidad de comunicarse con el sistema cRIO, lo cual se logra a través del módulo NI 9870, controlado desde el procesador en tiempo real.

A manera de resumen, la transferencia de los datos inicia desde el transductor o sonda de Langmuir, el Keithley 2425 adquiere los valores de corriente del plasma y el voltaje de polarización, los envía a través del puerto RS 232 hacia el cRIO, este a su vez envía los datos a la PC para su procesamiento, análisis y visualización.

El posicionamiento de la sonda dentro de la cámara se controla a través de un motor a pasos unipolar SLO-SYN KML 062S04, cuya secuencia de control es configurada en paso completo para avanzar un paso a la vez, aumentado el torque de paso y retención. El controlador de este motor es el módulo NI 9501, el cuál permite una conectividad directa con el motor. La figura 4.9, muestra el diagrama de conexión entre el motor y el módulo NI 9501 para la configuración antes descrita.



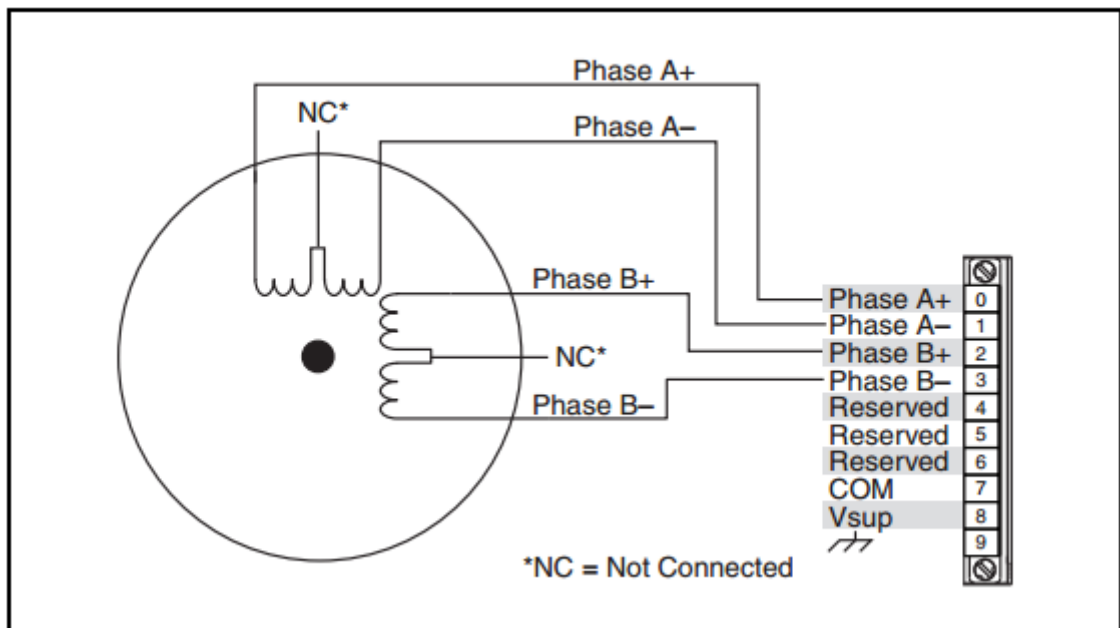


Figura 4.9: Diagrama de conexión entre el motor de pasos de la sonda y su controlador.[13]

### 4.3. Descripción detallada de la implementación del software

#### 4.3.1. Control de adquisición y procesamiento de datos de la sonda Langmuir

##### 4.3.1.1. Configuración de la comunicación serie con el Keithley 2425.

LabVIEW cuenta con su propio API para la comunicación serie llamado VISA. Este driver nos permite configurar el protocolo de comunicación RS 232 en términos de paridad, cantidad de bits de datos, caracter de terminación, tasa de transferencia de bits y control de flujo de datos. Para comunicarnos efectivamente con el Keithley se configuró el sistema como se muestra en la tabla 2.

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
Baud rate	9600
Term Char	<CR>
Bits	8
Paridad	None
Flow Control	OFF

Tabla 4.1: Parámetros para comunicación con Keithley 2425

La configuración de la comunicación con el Keithley se llevó a cabo utilizando el driver VISA Serial, con el cual se establecen parámetros como la tasa de transferencia de bits, paridad, caracter de terminación y número de bits. Este segmento tiene como entrada la referencia del puerto a través del cual se realizará la comunicación. Se utilizan nodos

de propiedad para establecer el modo de terminación de los datos de lectura y escritura. La figura 4.10 muestra el código descrito.

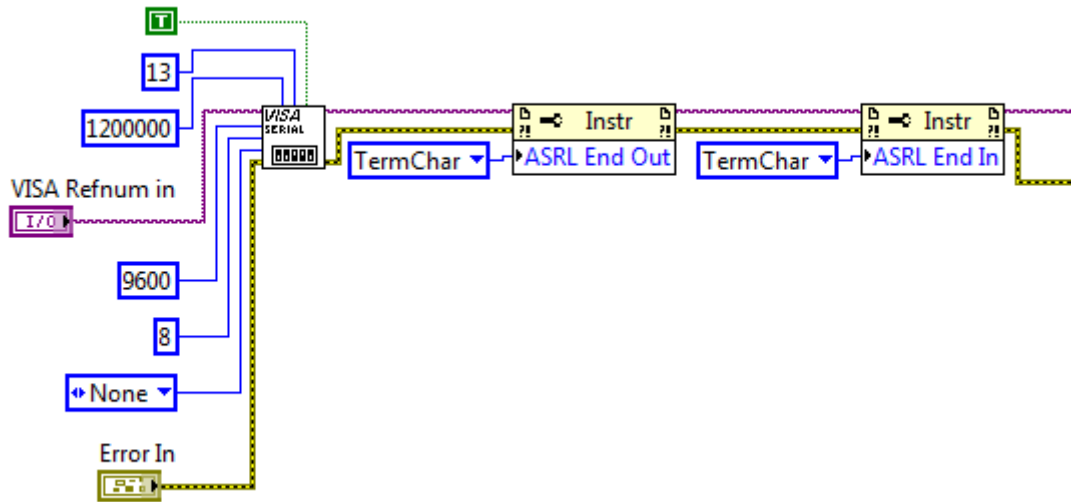


Figura 4.10: VI para configurar puerto serie.

#### 4.3.1.2. Configuración de la adquisición de datos de sonda Langmuir

Se basa en una arquitectura de máquina de estados que coordina la secuencia a seguir del proceso de acuerdo al diagrama de flujo mostrado en la figura 4.11. Donde se inicia con el estado de configuración del puerto serie, siguiendo los parámetros que se mostraron en la sección 4.3.1.1.

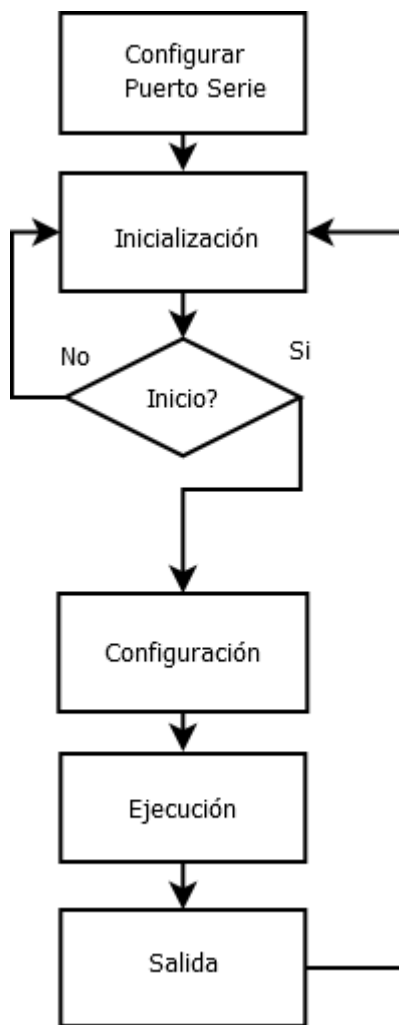


Figura 4.11: Diagrama de flujo de adquisición de datos de la sonda.

En el estado de inicialización se le solicita al Keithley su identificación, se hace un reinicio a los valores predeterminados del instrumento y se limpia el buffer de lectura, este estado espera la señal de inicio para seguir con el flujo de ejecución. Esta señal la ingresa el usuario una vez que el proceso de generación del plasma [16] ha concluido y el usuario desea realizar conocer los valores de temperatura y densidad electrónica de dicho plasma, si esto sucede el sistema salta al estado de configuración.

En el estado de configuración se programan las tareas que el instrumento realizará para una correcta adquisición de los datos de la sonda Langmuir. Un aspecto importante a tomar en cuenta en este estado es la utilización del estándar de sintaxis SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments) cual se definió en el protocolo IEEE 488.2 y consta de una serie de comandos utilizados por dispositivos para mediciones y pruebas programables. Los principales parámetros a configurar, son el tamaño del buffer, configuración del filtrado y la configuración de los parámetros de la generación de la rampa de tensión. La figura 4.12 muestra el código de configuración del Keithley.



El estado de ejecución envía el comando de inicio del proceso de adquisición de datos de la sonda Langmuir y espera a que este termine para saltar al estado de salida, en el cual el sistema devuelve el control de la ejecución al sistema de generación de plasma, ya sea para un nuevo diagnóstico o para proceder con el apagado del sistema generador de plasma.

Este dispositivo cuenta con un registro interno de quince bits en el cual se guardan todos los eventos que acontecen durante el proceso de medición, para efectos del presente proyecto, interesa el bit nueve, el cual indica cuando el buffer está lleno. Este proceso se debe de realizar para evitar que el programa salte al procesamiento de apagado sin haber adquirido y procesado los datos. La figura 4.13 muestra como constantemente se está leyendo dicho registro mediante el comando `:STAT:MEAS?`, luego se realiza la comparación del bit 9 y cuando está en estado activo sale del ciclo y continúa con la ejecución del programa.

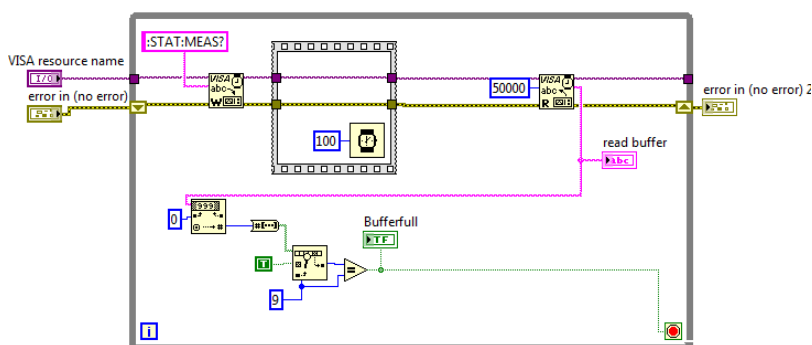


Figura 4.13: Código de espera hasta llenar el buffer.

El código de los estados de configuración y ejecución unidos siguen el diagrama de estados mostrado en la figura 4.14. En este se muestran también los comandos SCPI más importantes implementados.

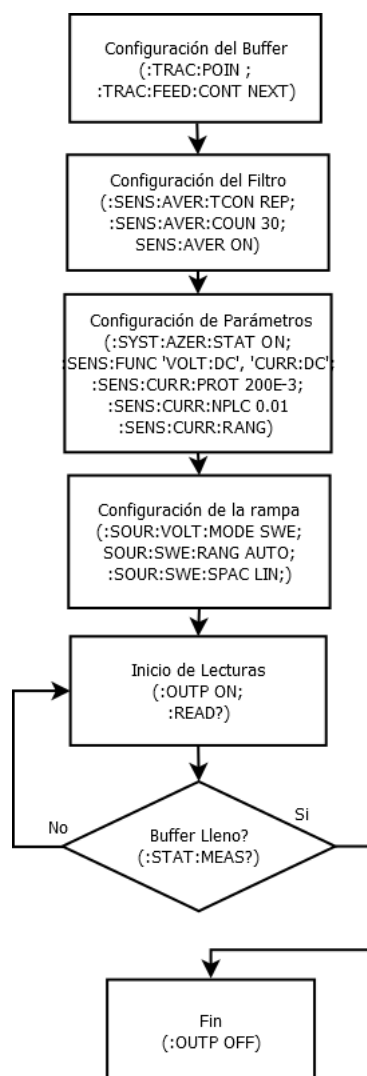


Figura 4.14: Diagrama de flujo de Keithley 2425.

#### 4.3.1.3. Controlador del motor pasos.

En este apartado se implementó el código necesario para controlar el motor de pasos de la sonda. Entre los aspectos importantes a considerar es la comunicación entre el computador, el controlador de tiempo real y la FPGA la cual se lleva a cabo por medio de canales DMA. Se debe recordar que se trata de hardware programable, por lo que se utiliza lenguajes de HDL para traducir el código a la combinación de bits a integrar en el hardware. En el presente proyecto se utilizó la plataforma LabVIEW FPGA el cual compila sobre VHDL.

Las figuras 4.15 y 4.16, muestran el control de posicionamiento de la sonda en la cámara por medio del motor a pasos. La funcionalidad del código del RT es darle una interfaz con el usuario a la FPGA, en esta sección se toman como entradas la distancia en mm que el usuario quiere desplazar y la dirección del movimiento, ya sea para arriba o para abajo. Estos datos se transfieren a la FPGA mediante un canal DMA "Setpoint", este primero se configura su tamaño o profundidad, el cual depende directamente de la distancia a recorrer. En la figura 4.16 se leen los datos del mismo canal DMA para su procesamiento en términos de posición y velocidad para controlar el motor a través del módulo NI 9501.

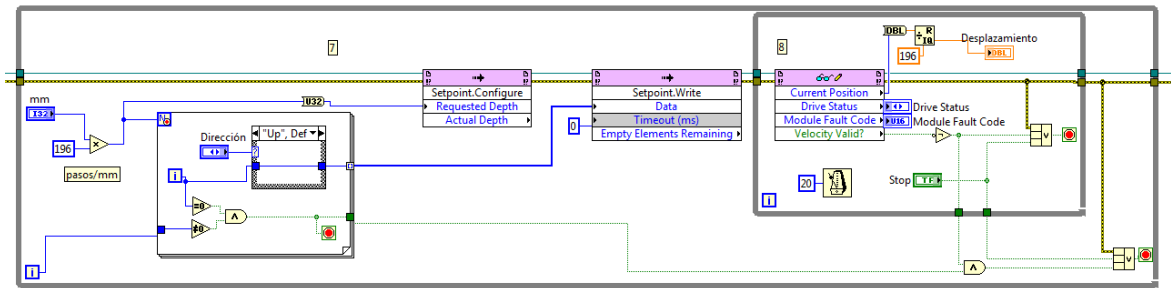


Figura 4.15: Control de posicionamiento de la sonda (RT).

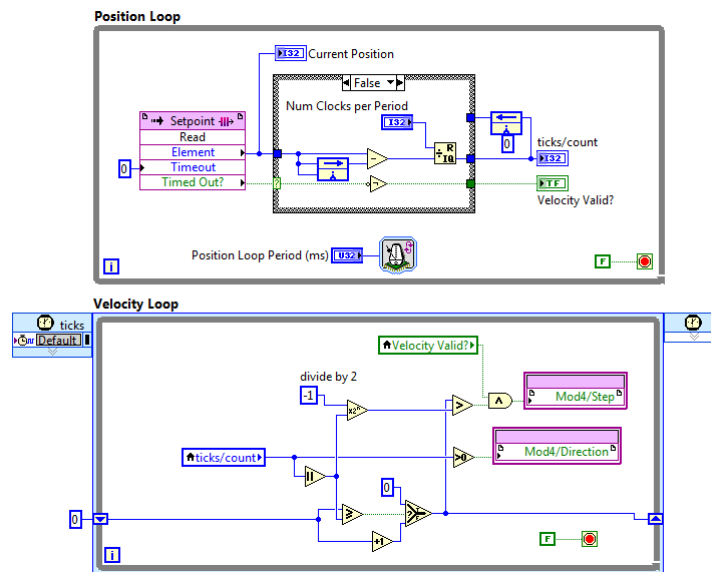


Figura 4.16: Control del posicionamiento de la sonda (FPGA).

#### 4.3.1.4. Algoritmos de procesamiento de datos para calcular los parámetros de temperatura y densidad electrónica, potencial flotante y corriente de saturación del plasma.

El procedimiento para el cálculo de los parámetros del plasma se describe en el diagrama de flujo mostrado en la figura 4.17.

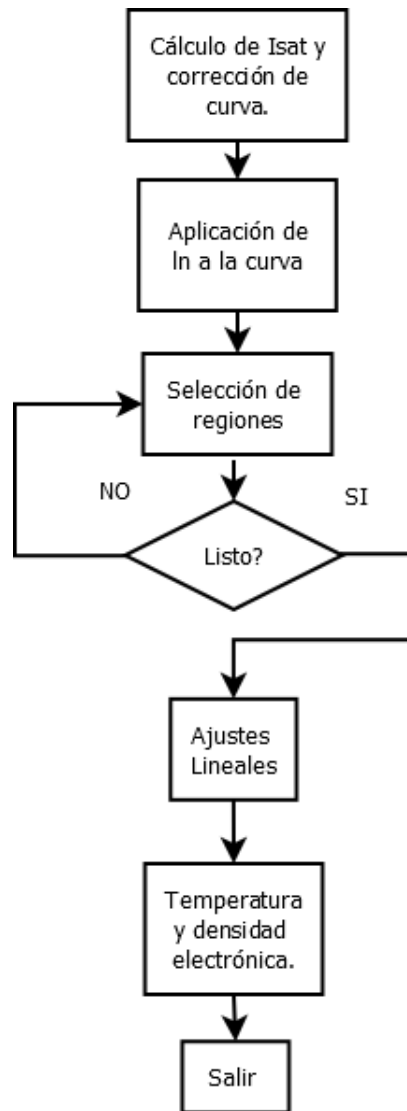


Figura 4.17: Diagrama del procesamiento de datos de la sonda de Langmuir.

Se debe destacar que los algoritmos en este procedimiento siguen el expuesto en la sección 3.3, cuyo análisis completo se muestra en [9].

Primero se debe corregir la curva para evitar perder los datos negativos a la hora de aplicar el logaritmo natural, en este estado se calcula la corriente de saturación del plasma y el potencial del plasma, cuyos valores se leen directamente de la curva I - V. En el siguiente estado se aplica el logaritmo natural para linealizar las regiones exponenciales y poder aplicar los ajustes lineales para calcular la temperatura y densidad electrónica.

En el estado de selección de regiones, se le permite al usuario navegar por la gráfica para seleccionar las regiones de interés para aplicar los ajustes lineales. Una vez finalizado este proceso se realizan los cálculos de temperatura y densidad electrónica y se devuelve al flujo de ejecución del programa principal. La figura 4.18 muestra el código de LabVIEW que ejecuta la descripción anterior.



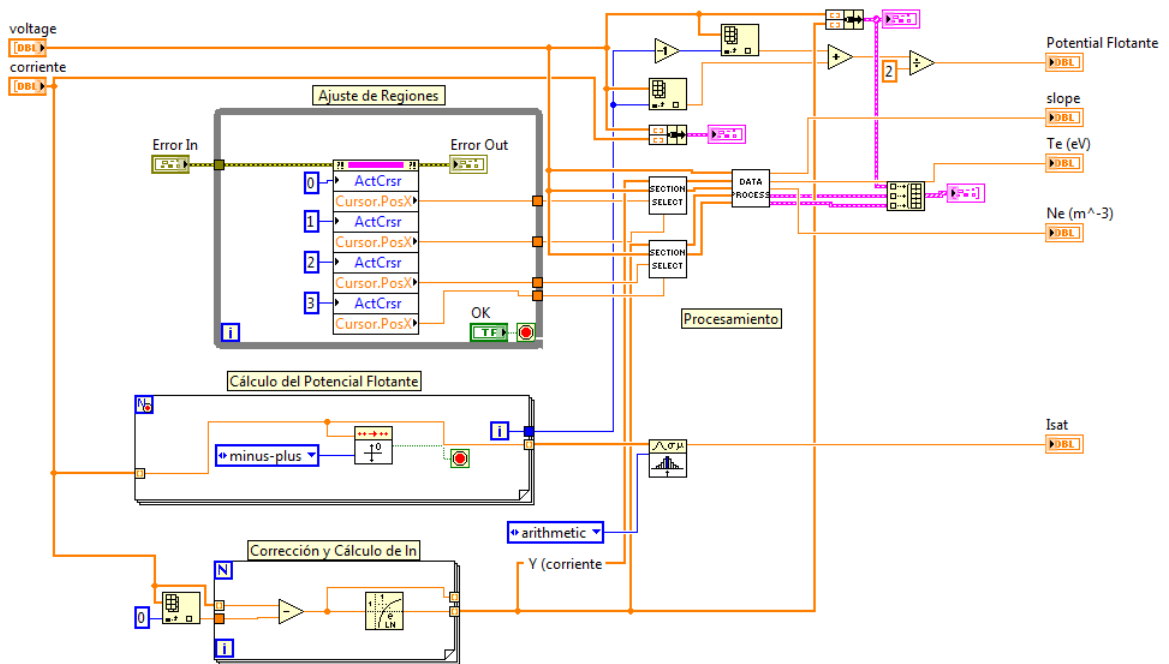


Figura 4.18: Código para ejecutar algoritmos de procesamiento de los datos.

Como se muestra en la figura 4.18, el procedimiento de los datos se ejecuta en el subVI *Data Process*, cuyo código se muestra en la figura. En él se aplican los ajustes lineales mediante el VI Linear Fit, el cual calcula la línea de mejor ajuste, la pendiente y el intercepto, la temperatura electrónica es el inverso de dicha pendiente.

Una vez que se tiene la temperatura electrónica y la corriente de saturación se puede calcular la densidad electrónica mediante la aplicación de la ecuación 2.12. La figura 4.19 muestra el código que calcula y visualiza los ajustes lineales y calcula la temperatura y densidad electrónica.

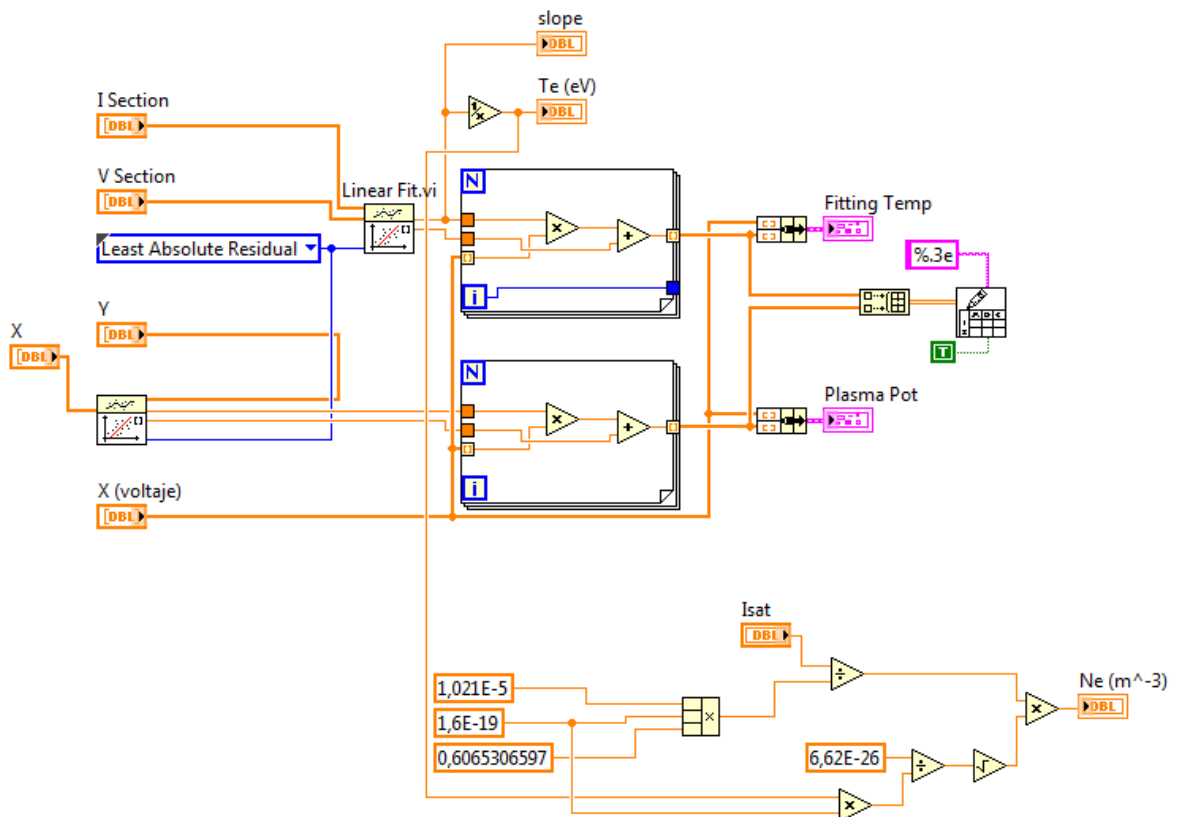


Figura 4.19: SubVI *Data Proces* para calcular temperatura y densidad electrónica.

#### 4.3.1.5. Adquisición y procesamiento de datos del interferómetro heterodino de microondas.

El control de la adquisición de datos desde la tarjeta PCI DAS 4012/12 se logra a través de la biblioteca ULx para LabVIEW, de la compañía Measurement Computing. Con esta biblioteca se controla la cantidad de muestras y la frecuencia de muestreo de la tarjeta, con esto el software reconoce que tamaño debe asignarle al buffer en el bus PCI para la transmisión de los datos hacia la memoria RAM del computador.

En este apartado se utilizó la estructura productor-consumidor de LabVIEW, en la cual se tiene un ciclo productor que se encarga de la adquisición de los datos, mientras que otro ciclo llamado consumidor se encarga del procesamiento de los mismos. Los datos se pasan entre ciclos se realiza mediante colas, las cuales no permiten la pérdida de estos y habilita la posibilidad de adquirir y procesar a ritmos distintos cuando la aplicación lo requiera.

La configuración de las tareas de la tarjeta de adquisición de datos se muestra en la figura 4.20. Donde se establece una adquisición analógica de voltaje, a un tasa de muestreo de 20 MHz, que se obtienen múltiples muestras desde múltiples canales.

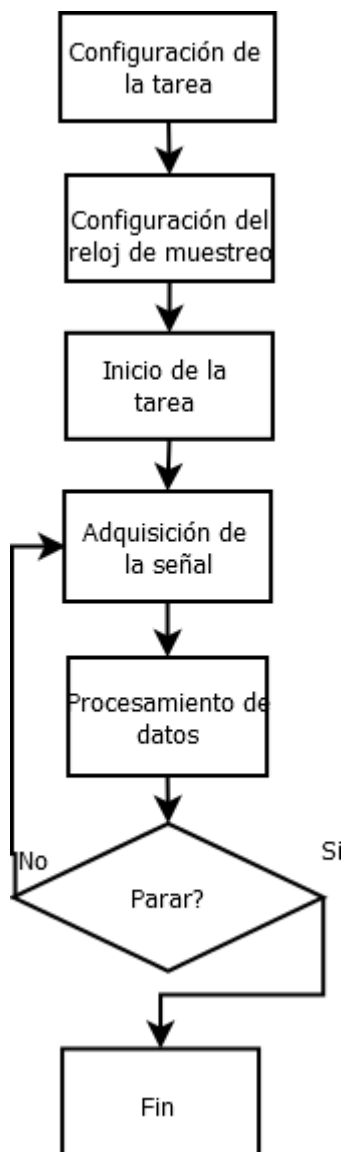


Figura 4.20: Configuración de tareas de la tarjeta PCI DAS 4020/12.

La adquisición de datos del interferómetro se realiza con el código mostrado en la figura 4.21, la cual muestra una estructura productor-consumidor. El ciclo productor se encarga de adquirir los datos desde la tarjeta de adquisición. Estos datos son enviados al ciclo consumidor para el cálculo del desfase entre la señal de referencia y la señal que pasa a través del plasma. También se aplica una transformada rápida de Fourier para corroborar que la frecuencia central se localiza alrededor de 1 MHz.

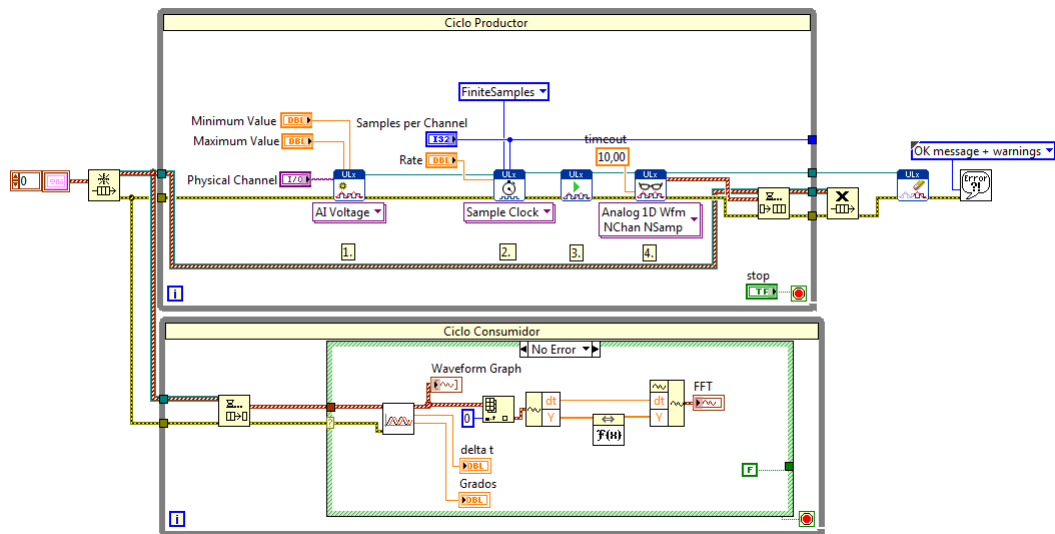


Figura 4.21: Adquisición de datos del Interferómetro.

El procesamiento se lleva a cabo en el subVI llamado *Phase Difference*, en el cual se calcula el desfase entre las señales utilizando el método de cruce por cero. Para esto se utilizan dos ciclos for con entrada autoindexada, esto es, toma un punto del arreglo de entrada por iteración del ciclo. Se utiliza el VI Zero Crossings PtByPt, el cual devuelve una variable booleana en verdadero cuando se detecta un cambio de signo en la señal, es decir existe un cruce por cero. El objetivo es saber la cantidad de puntos que existen entre el primer cruce por cero y el segundo, con esto y la base de tiempo de muestreo se puede calcular el desfase entre las señales. La figura 4.22 muestra el código descrito.

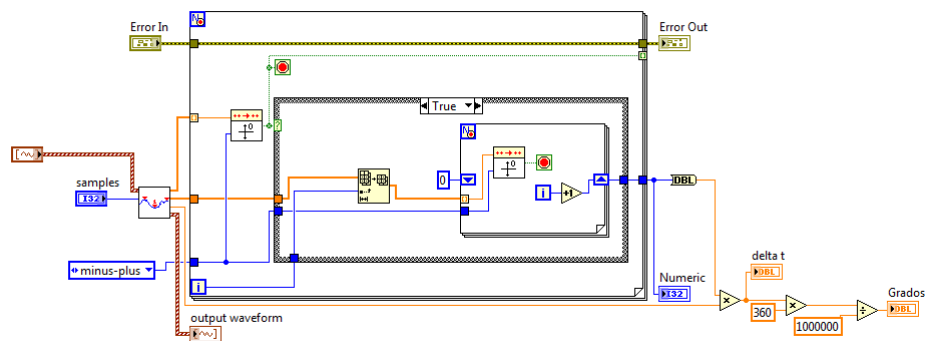


Figura 4.22: VI para determinar el desfase entre ambas señales.

# Capítulo 5

## Análisis de resultados

### 5.1. Resultados experimentales

#### 5.1.1. Sonda Langmuir

La figura 5.1 muestra el resultado final del proceso de construcción y ensamble de la sonda de Langmuir.

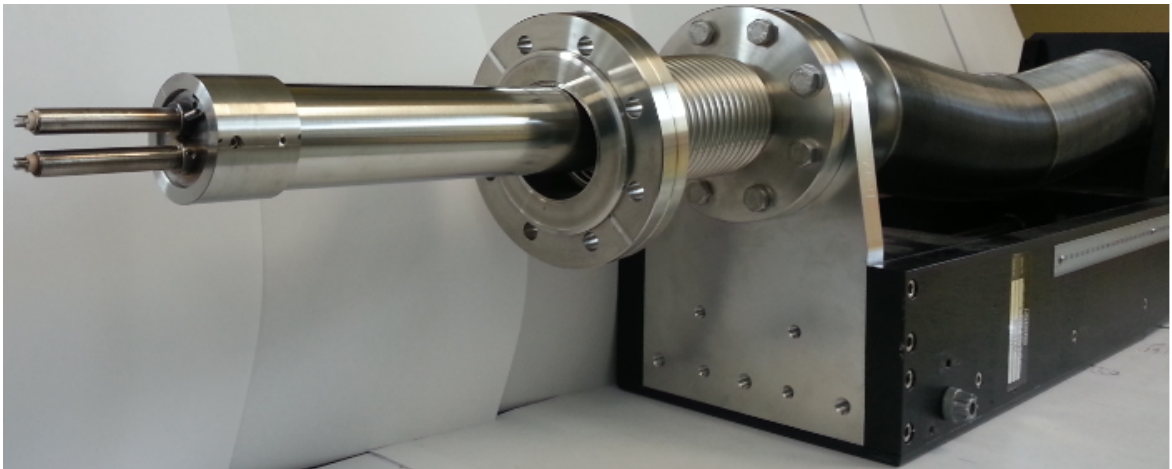


Figura 5.1: Sonda Langmuir para el SCR-1.

Para realizar un estudio correcto del plasma mediante este diagnóstico se debió crear una gráfica de corriente versus voltaje, esta se realizó de tres maneras, una manual variando una tensión con la fuente bipolar marca Kepco y midiendo punto a punto la corriente obtenida de la sonda. Esto se realizó para crear un parámetro de referencia para comparar los resultados obtenidos con el sistema diseñado , además de establecer a partir de cuales niveles de presión y gas ionizado la curva es analizable. La figura 5.2 muestra la gráfica de referencia obtenida de modo manual.

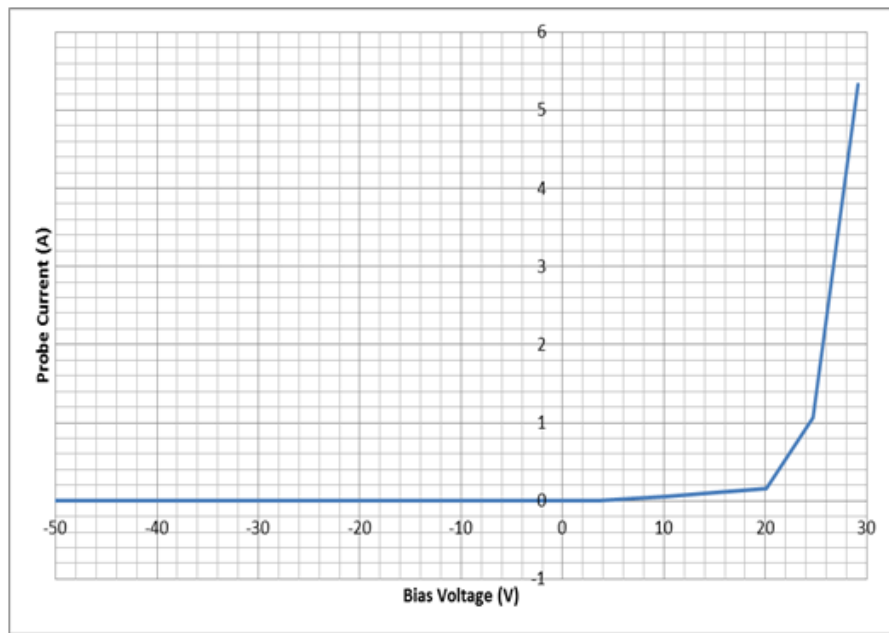


Figura 5.2: Gráfica I vs V de referencia.

En la siguiente aproximación que se utilizó el módulo NI 9227 para medir la corriente de la sonda, sin embargo debido a los valores tan bajos de corriente, este no muestreó de manera adecuada la misma. La figura 5.3 muestra el resultado de medir la corriente con el módulo NI 9227.

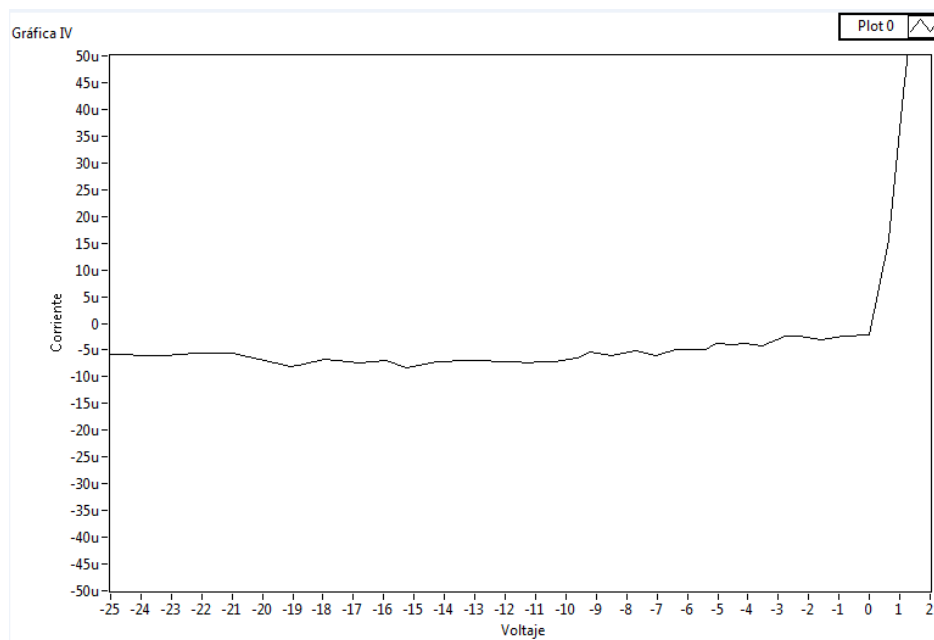


Figura 5.3: Curva de corriente obtenida con NI 9227.

A partir de este punto se sigue el diseño experimental mostrado en [9]. La figura muestra la rampa generada de manera automatizada en donde se muestra la señal de voltaje vs el número de punto en el buffer.

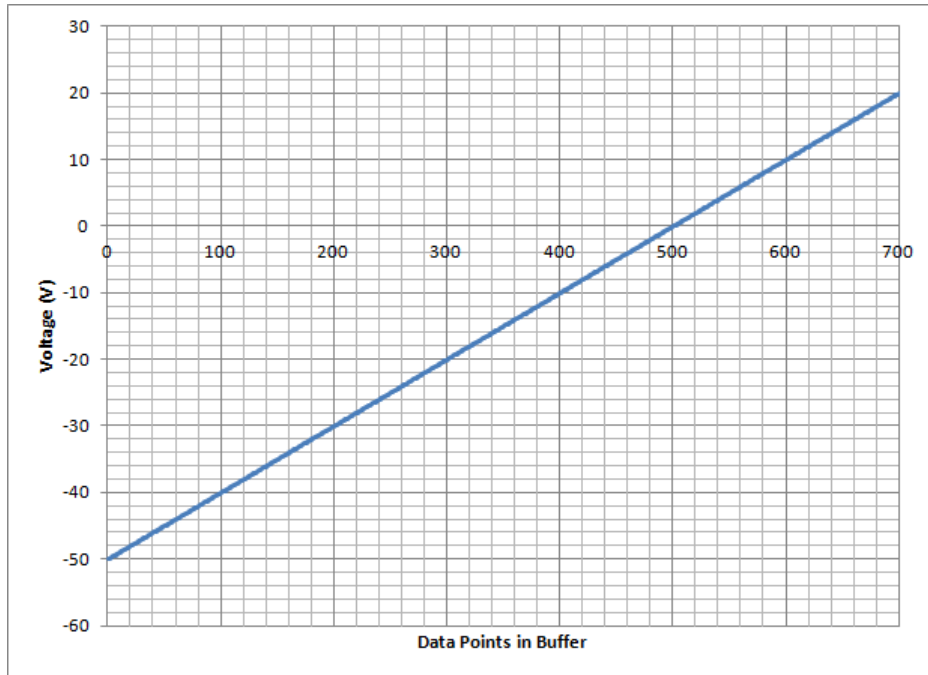


Figura 5.4: Rampa de tensión generada de manera automática.

La figura 5.5 muestra la forma de la señal de corriente de la sonda medida con el Keithley 2425.

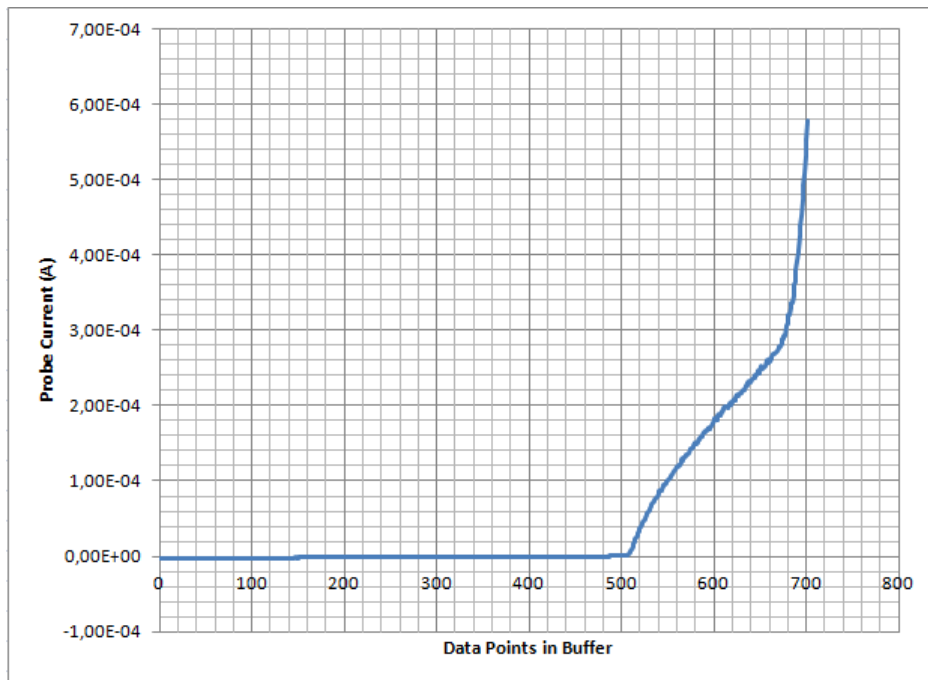


Figura 5.5: Medición de corriente de la sonda vs números de puntos en el buffer.

Una vez que se obtuvo una referencia adecuada, se generó de forma correcta de la rampa de tensión y se adquirió correctamente la señal de corriente de la sonda, se implementaron los algoritmos de procesamiento de los datos para el cálculo de la temperatura y densidad electrónica, potencial flotante, corriente de saturación y potencial del plasma, obteniendo los resultados mostrados a continuación

La figura 5.6 muestra la curva característica de la sonda Langmuir.

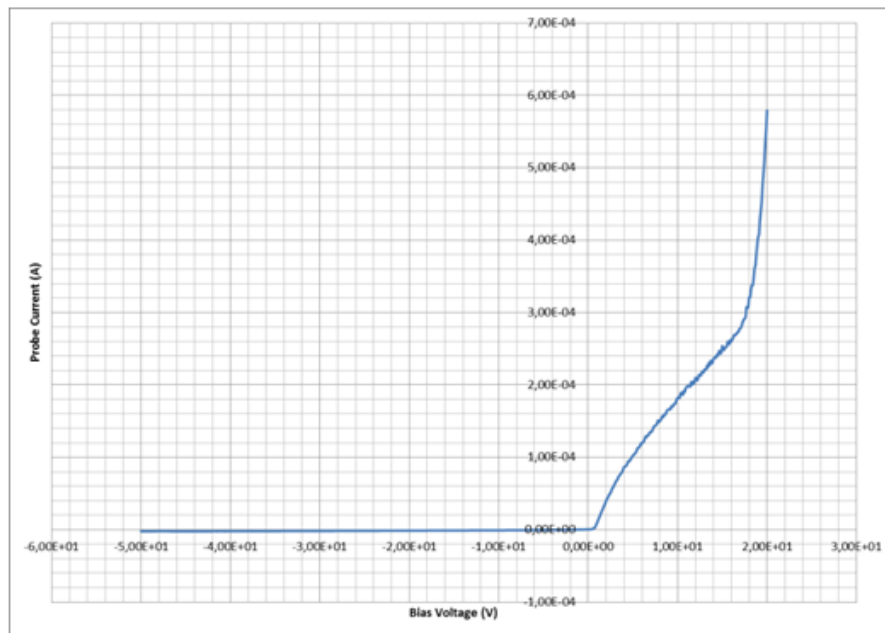


Figura 5.6: Gráfica I vs V obtenida con el sistema implementado.

Las figuras 5.7 y 5.8 muestran las regiones de corriente de saturación y potencial flotante del plasma respectivamente. Para calcular la corriente de saturación se realizó un análisis para determinar la tendencia central de los datos.

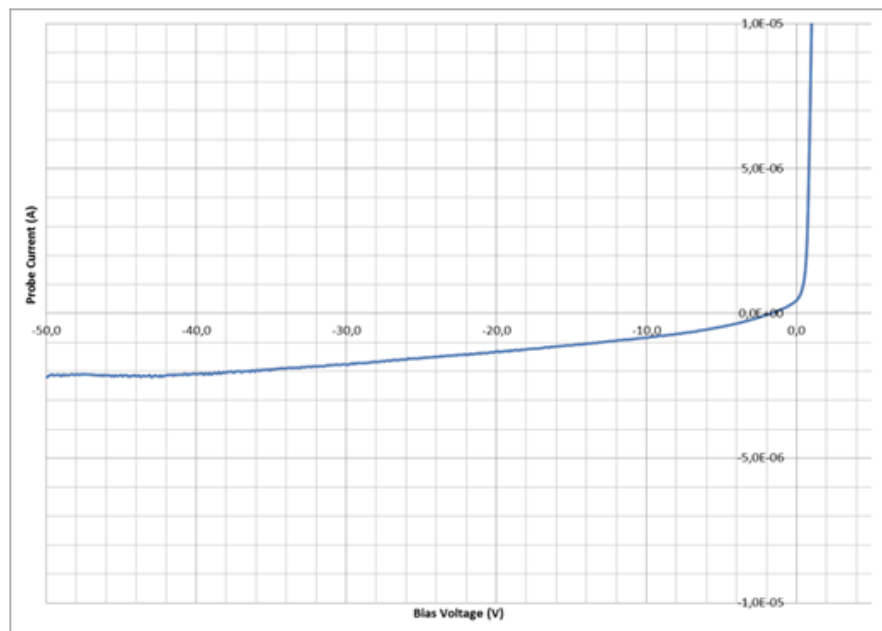


Figura 5.7: Región de corriente de saturación.



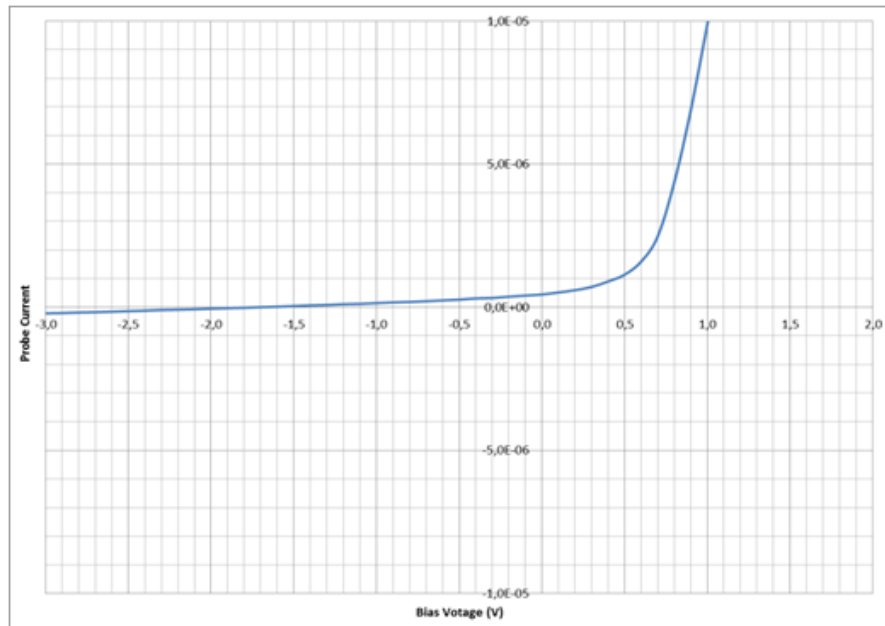


Figura 5.8: Potencial flotante del plasma.

Para continuar con el análisis se debe de corregir el efecto de la corriente de saturación sobre la corriente de la sonda, ya que la primera es efecto solamente de la captura de iones que se produce al aplicar tensiones negativas. Esta corrección se realiza mediante la diferencia entre la corriente de saturación y la corriente de la sonda, el efecto que esto causa es un offset hacia voltajes positivos en la figura 5.2. La figura 5.9 muestra la corrección aplicada a los datos obtenidos con el sistema.

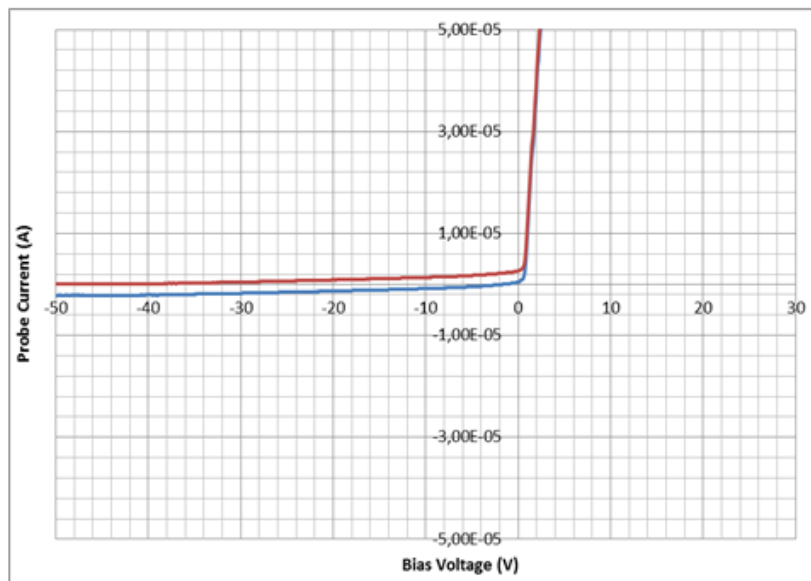


Figura 5.9: Corrección de la corriente de la sonda.

La figura 5.10 muestra el nuevo conjunto de datos al cual se aplicó la corrección antes mencionada.

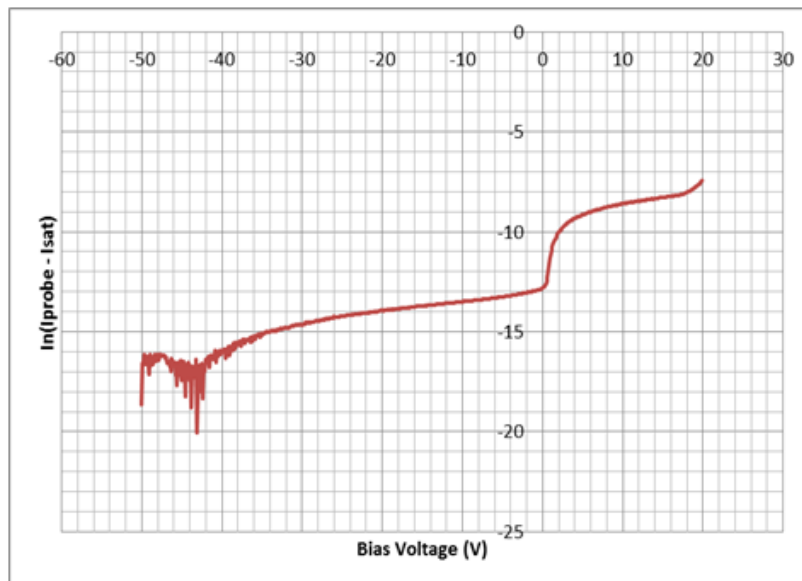


Figura 5.10: Corriente de electrones.

Para calcular la temperatura electrónica del plasma, se hace un ajuste en la parte lineal de la figura 5.10, es decir cuando la gráfica de corriente vs voltaje crece exponencialmente. Dicho ajuste presenta la forma  $y = mx + b$ , por lo que la pendiente del ajuste en la región lineal se relaciona con la temperatura electrónica. Existe otra linealidad en la región de saturación electrónica, en la cuál se realizó también un ajuste lineal, esto con el propósito de encontrar el potencial del plasma, el cual se lee de la gráfica en el punto en que ambos ajustes lineales se intersecan. En la figura 5.11 se muestra los resultados obtenidos de el proceso descrito anteriormente.

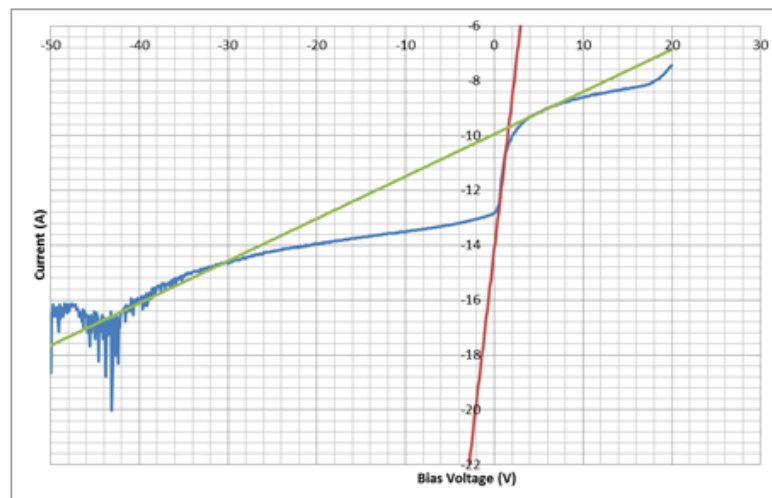


Figura 5.11: Ajustes lineales para determinar la temperatura electrónica y el potencial del plasma.

El análisis anterior se aplicó también a la curva I - V obtenida de manera manual con el fin de comparar los valores obtenidos, los resultados se resumen en la tabla 5.1.

Tabla 5.1: Parámetros obtenidos del plasma generado en la cámara de aplicaciones industriales.

PARÁMETRO	AUTOMÁTICA	MANUAL	% DE ERROR
Corriente de saturación	1,47224 uA	1,3844 uA	4 %
Potencial flotante	-1,75 V	-1,75 V	0 %
Potencial del plasma	1,6265 V	1,5523V	5 %
Temperatura electrónica	0,462483 eV	0,4 eV	7 %
Densidad electrónica	1,40541 E+15 $m^{-3}$	1 E+15 $m^{-3}$	6 %

Uno de los objetivos del presente proyecto era la implementación de una interfaz centralizada la cuál permitiera la visualización e interacción del usuario con los datos obtenidos. Esta se muestra en las figuras 5.12 y 5.13.

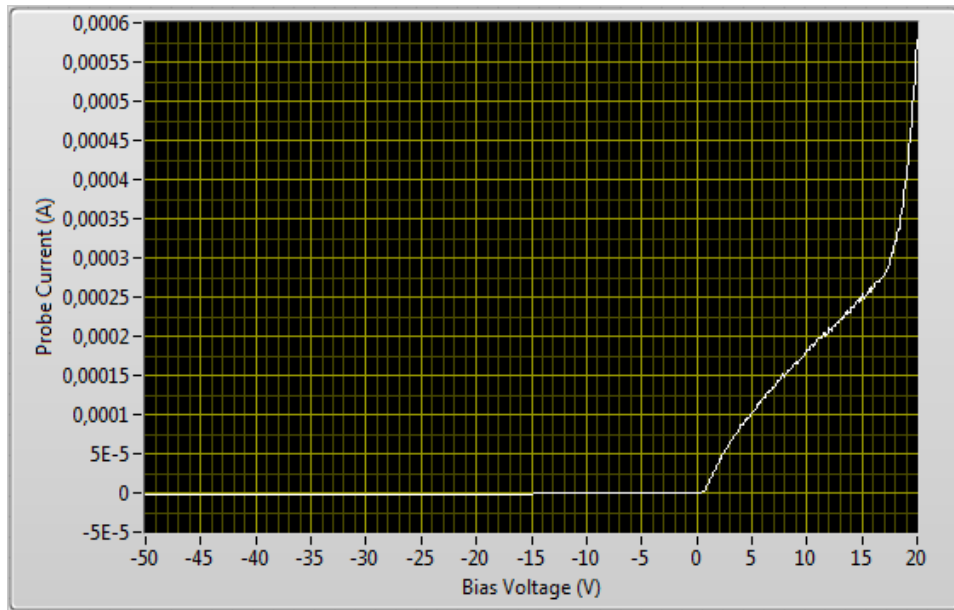


Figura 5.12: Interfaz de la curva I vs V.

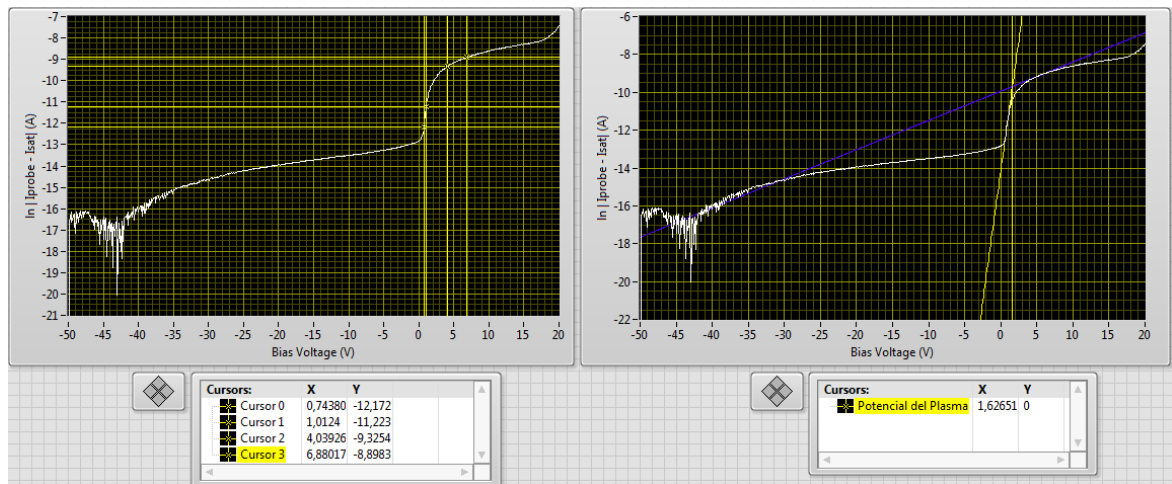


Figura 5.13: Interfaz de análisis de la gráfica.

Los resultados obtenidos del procesamiento se muestran también en la interfaz de usuario como se muestra en la figura 5.14.

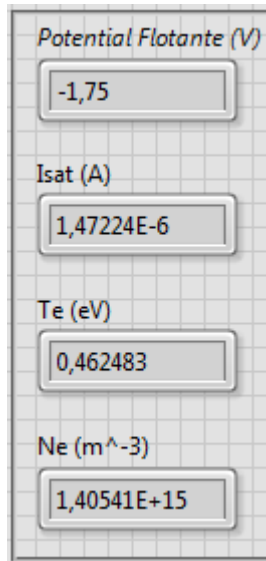


Figura 5.14: Valores de los parámetros del plasma mostrados en la interfaz de usuario.

Se debe resaltar que todos los datos son almacenados también en el computador para su posterior análisis, también se almacena un registro de los eventos del sistema completo de generación y diagnóstico del plasma. Estos registros se muestran en el cuadro 5.2.

Tabla 5.2: Registro de eventos del proceso de generación y diagnóstico del plasma.

HORA	EVENTO
2:11:39 p.m.	Inicio del proceso
2:11:39 p.m.	Bomba mecánica activada
2:12:53 p.m.	Bomba turbo activada
2:14:44 p.m.	Presión de vacío alcanzada
2:14:44 p.m.	Inicio inyección de gas
2:15:08 p.m.	Fin de inyección de gas
2:15:08 p.m.	Inicio calentamiento
2:15:09 p.m.	Inicio Langmuir
2:20:07 p.m.	Fin Langmuir
2:20:07 p.m.	Fin calentamiento
2:21:35 p.m.	Fin Proceso

### 5.1.2. Interferómetro heterodino

El interferómetro heterodino no pudo ser implementado debido a la falta de las guías de onda para el ajuste en la cámara de reacción, las mismas fueron compradas, sin embargo no llegaron a tiempo para implementarlo en el presente proyecto. Por este motivo se simularon las señales esperadas del interferómetro para comprobar el funcionamiento de la interfaz de procesamiento de los datos del interferómetro, la cual debe ser capaz de medir el tiempo entre las señales.

Se simularon dos señales senoidales con una frecuencia de 1 MHz, a las cuales se les indujo una serie de desfases, los cuales deben ser medidos por los algoritmos implementados. La figura 5.15 muestra la interfaz de sistema de adquisición del interferómetro.

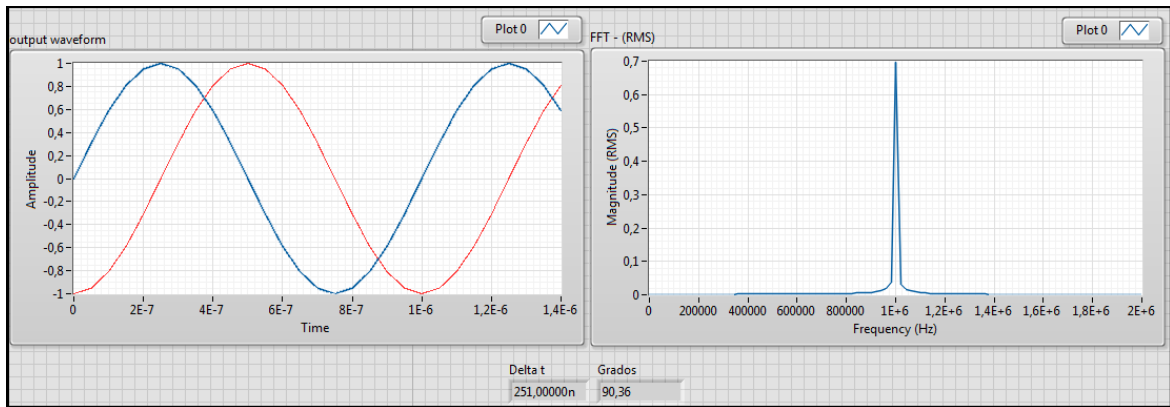


Figura 5.15: Interfaz en el computador del interferómetro.

## 5.2. Análisis de resultados

La figura 5.2 presenta los datos obtenidos de manera manual, el experimento consistió en implementar el circuito de medición mostrado en la figura 1 de [9], para medir punto a punto los valores respectivos de tensión de polarización de la sonda y la corriente obtenida por la sonda debido a la captura de los iones y electrones presentes en el plasma. Se tomaron cien puntos distribuidos desde -50 V hasta 30V, que permitieron concluir la configuración que debe cumplir el proceso de generación del plasma para poder analizar el mismo mediante el método de sonda de Langmuir. Esta gráfica se implementó también como referencia para la curva tomada por el sistema de adquisición diseñado, ya que esta sigue el patrón esperado de la curva característica de las sondas de Langmuir y permitió calcular por primera vez los parámetros de un plasma generado en el laboratorio de plasmas del TEC.

Debido a que las bajas condiciones del plasma generado, en términos de partículas ionizadas, la corriente a medir es del orden de los microamperios, lo que hace difícil su medición ya que las bombas de vacío, fuente DC y otras conexiones eléctricas generan ruido que disminuyen la relación señal a ruido, es decir, la señal de corriente a medir se mezcla con señal de ruido. Como se muestra en la figura 5.3, la cual no representa correctamente el comportamiento esperado de la curva característica de la sonda de Langmuir ya que se nota una señal muy ruidosa e inestable, lo que no permite un procesamiento adecuado de los datos.

La primer prueba funcional del sistema de adquisición de datos diseñado arrojó como resultado la gráfica presentada en la figura 5.6. Para obtener dicha gráfica se tomaron 700 puntos distribuidos uniformemente en el mismo rango de voltaje de polarización, esto significó poder obtener una gráfica mucho más precisa que las anteriores. Las regiones de mayor interés en una curva característica de sonda Langmuir son: región de corriente de saturación, región de potencial flotante y la región de saturación de electrones, esta última se muestra claramente en la figura 5.6, a partir de aproximadamente 15 V de polarización.

Las figuras 5.6 a 5.11 evidencian que se implementaron efectivamente los algoritmos de procesamiento de los datos para el cálculo de los parámetros del plasma, ya que estas figuras se realizaron siguiendo el análisis detallado en [9] y la forma de las curvas coinciden con las obtenidas del procesamiento de los datos del presente proyecto.

En la figura 5.7 se amplía la escala de corriente para poder visualizar la región de saturación de iones, como se aprecia en la figura la corriente de saturación presenta a

-50 V un valor de -1uA, a partir del cuál disminuye hasta cruzar por cero, el potencial en este punto se le llama potencial flotante y se muestra en la figura 5.8, con un valor de -1,75 V. Con los valores de la corriente de saturación y potencial flotante se puede inferir que el plasma generado es frío y que su temperatura no aumentará más allá de 1eV.

Lo anterior se corrobora de acuerdo a los valores mostrados en la tabla 5.1, en la que se demuestra que el plasma diagnosticado es muy frío (0,4 eV). Esto se debe principalmente a limitantes mecánicas de la cámara de reacción, ya que imposibilitaron colocar la sonda cerca de la zona con alta concentración de plasma, en cambio se debió colocar la sonda en un punto lejano del pin, razón por la cuál el plasma que llega a la sonda es débil. Para compensar este problema se debe aumentar el flujo de gas en la cámara y aumentar la tensión DC para ionizar más partículas y generar un plasma más denso.

La tabla 5.1 muestra también la comparación entre los resultados obtenidos de manera manual y de manera automática, se puede ver que los porcentajes de error son elevados, esto es debido a que la curva manual se construyó a partir de solamente 100 puntos, mientras que de la manera automática se realizó con 700 puntos lo que permite construir una curva con mayor precisión. Otro punto a considerar para explicar los altos porcentaje de error en la forma de medición de la corriente. Mientras que en la adquisición manual se implementó el circuito de la figura 2.3, la adquisición automática se realizó mediante el circuito mostrado en la figura 4.8, este último elimina mediciones indirectas de corriente a través de la resistencia lo que aumenta la precisión del datos medido. A pesar de los altos porcentajes de error, los valores obtenidos por ambos métodos de medición tienen el mismo orden de magnitud por lo que se puede considerar que el sistema cumple con el objetivo de obtener la densidad y la temperatura electrónica del plasma.

Las figuras 5.12, 5.13 y 5.14 muestran la interfaz en el computador de los datos obtenidos que representa un medio de visualización centralizado del proceso de diagnóstico por sonda Langmuir.

Para un funcionamiento adecuado del interferómetro ambas señales debe recorrer la misma distancia desde los osciladores hasta los mezcladores, esto para evitar desfases producidos meramente por cuestiones mecánicas que puedan alterar las mediciones de densidad electrónica, en primera instancia el diseño original del instrumento no cumplía con este requerimiento.

Sumado a lo anterior, el interferómetro fue diseñado para la cámara de reacción del SCR-1, no para la cámara de aplicaciones industriales, por estos motivos de debió realizar la compra de guías de onda adicionales, las cuales para el momento de finalización del presente proyecto no habían llegado al laboratorio por lo que fue imposible implementar el interferómetro. Sin embargo se probaron los algoritmos de cálculo de desfase mediante señales simuladas. La figura 5.15 muestra un resultado ilustrativo del algoritmo.

El algoritmo de detección de fase se basa en medir los cruces por cero de la señal, esto se almacenando el dato anterior y comparando con el dato actual, si tienen signos opuestos se indica que hubo un cruce por cero. La escogencia de este algoritmo de detección de fase se baso en la ventaja de que no depende de la amplitud de las señales, asegurando que la medición será siempre efectiva aún cuando la señal se distorsione o se de algún tipo de pérdida de amplitud. También influyó el hecho de que este esquema evita ambigüedades en la lectura de puntos máximo y mínimos requeridos por otros métodos de detección de desfase.

Debido a que el algoritmo mide cuando hubo un cambio de signo entre dos puntos adyacentes se debe de asegurar que la distancia entre dichos puntos sea la más pequeña posible. Esto se logra muestreando las señales a 20 MHz, lo que indica que entre cada muestra existe un  $\Delta t$  de 50ns, lo que representa un que el sistema puede medir como mínimo saltos de  $18^\circ$ , que no es una media precisa. Para solucionar este problema se realizó una interpolación para calcular 50 muestras intermedias separadas entre cada una por 1 ns, disminuyendo a  $0,36^\circ$  el salto mínimo de grados a medir, con lo que se aumentó la precisión en la medida del desfase entre la señal de referencia y la señal que atraviesa el plasma.

# Capítulo 6

## Conclusiones

### 6.1. Conclusiones

Mediante el desarrollo del proyecto se logró implementar una plataforma funcional de adquisición de valores de tensión y corriente de los diagnósticos del plasma de SCR-1 y se identificaron e implementaron los algoritmos requeridos para el procesamiento de estos para obtener los valores de temperatura y densidad electrónica, potencial flotante, potencial del plasma y corriente de saturación.

El sistema diseñado permitió la configuración y el control de la sonda Langmuir del SCR-1 para la adquisición y procesamiento de los datos y el respectivo diagnóstico del plasma generado en este, facilitando la investigación en plasmas en el Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Se logró implementar una interfaz de usuario que presenta los datos de temperatura y densidad electrónica, potencial flotante, potencial del plasma y corriente de saturación del plasma de manera centralizada para una visualización y síntesis más efectiva de los mismos, facilitando también el almacenamiento de los datos importantes del proceso en la memoria del computador.

Los valores de temperatura electrónica y densidad electrónica medidos, 0.462483 eV y  $1.40541 \text{ E} +15 \text{ m}^{-3}$  respectivamente, indican que el plasma que se genera en la cámara de aplicaciones industriales es frío y poco denso.

Se demostró la facilidad que ofrece LabVIEW de integrar sistemas con hardware ajeno a National Instruments, específicamente en este proyecto se integró con el sistema de medición Keithley 2425 a través de su controlador VISA.

El sistema implementado cumple con todos los objetivos específicos del presente proyecto.

### 6.2. Recomendaciones

Con el propósito de mejorar las medidas y disminuir el ruido en la señal de medición se recomienda mejorar la tierra de la cámara de aplicaciones industriales, también se recomienda utilizar cables blindados de tipo BNC para la medición de la corriente de la sonda de Langmuir.

Se debe colocar la sonda en una posición más adecuada en la cámara de tal forma que se logre diagnosticar plasmas más calientes y más densos para obtener resultados aún



mejores. Se sugiere colocar la sonda en el puerto superior del centro de la cámara de tal forma que el pin de descarga DC quede cerca de la sonda.

Para mejorar la eficiencia del sistema se recomienda probar el módulo NI 9203 para medir la corriente de la sonda ya que este sería capaz de monitorizar la corriente en los ocho electrodos simultáneamente.

# Bibliografía

- [1] What is compactrio? ([document](#)), [3.1](#), [3.2](#)
- [2] What is labview? [3.2](#)
- [3] Understanding fusion, 2012. [1.1.1](#)
- [4] Stellarator, 2013. ([document](#)), [1.2](#)
- [5] Boozer A. What is a stellarator? *Physics of Plasmas*, 5(5):1647–1655, Mayo 1998. [2.3](#)
- [6] BATICER. Reactores de fusión. [1.1.2](#)
- [7] F. Chen. *Lecture Notes on Langmuir Probe Diagnostics*. IEEE-ICOPS, 2003. [2.1.4](#)
- [8] F.F. Chen. *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*. Number v. 1. Springer, 2010. ([document](#)), [2.1.1](#), [2.1](#), [2.1.1](#), [2.2.4](#)
- [9] Pace D. Example of langmuir probe analysis, September 2010. ([document](#)), [1.4.1](#), [2.3](#), [2.4](#), [3.3](#), [4.3.1.4](#), [5.1.1](#), [5.2](#)
- [10] Martinez E. Teoría del muestreo de nyquist, Julio 2007. [2.2.4](#)
- [11] Nascimento I.C. de Sá W.P. Elizondo J.I., Korneev D. Teabr interferometer. *Brazilian Journal of Physics*, 32:123 – 130, 2002. ([document](#)), [2.2.2](#), [2.5](#), [2.6](#), [2.2.3](#)
- [12] Riascos H. Franco L., Pérez J. Diagnóstico de un plasma por sonda langmuir. *Sciencia Et Technica*, 13:439–442, 2007. [1.1.3](#)
- [13] National Instruments. ([document](#)), [1.2.1](#), [4.9](#)
- [14] Graff J. La evolución de labview: Décadas de desarrollo. *Instrumentation Newsletter*, 21(2):3–27, 2009. [2.4](#)
- [15] Morera J. Estudio de estructuras en el borde del plasma de tj-ii con sondas de langmuir. montaje de sondas tipo rake en tj-ii y diseño de una sonda de langmuir para el stellarator scr-1. Master’s thesis, Intituto Tecnológico de Costa Rica, 2009. ([document](#)), [1.1.3](#), [1.3](#), [2.1](#), [2.7](#), [3.1.3](#), [4.2](#)
- [16] González G. Jeferson. Automatización del proceso de generación de plasma para los dispositivos experimentales desarrollados en el laboratorio de física de plasma del instituto tecnológico de costa rica. Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura. [4.1.2](#), [4.3.1.2](#)

- [17] Carranza José M. Investigación y desarrollo del interferómetro heterodino de microondas para el scr-1. Master's thesis, Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2009. ([document](#)), [1.3](#), [2.2.3](#), [2.8](#)
- [18] Chamorro B. María. Estudio de fluctuaciones de temperatura y densidad en el borde del plasma en dispositivos tokamak y stellarator. Master's thesis, Universidad Complutense de Madrid. [2.1.2](#)
- [19] Energía Nuclear. Fusión nuclear. [1.1.1](#)
- [20] PlasmaTEC. Grupo de plasma y sus aplicaciones. [1.2.3](#), [2.3.1](#), [2.3.3](#)
- [21] Merlino L. Robert. Understanding langmuir probe current-voltage characteristics. *American Association of Physics Teachers*, 75:1078–1085, 2007. ([document](#)), [2.1.3](#), [2.2](#)