

Diseño conceptual de una sonda Langmüir para caracterización de plasmas fríos mediante diseño estadístico de experimentos.

Conceptual design of a Langmüir probe for cold plasma characterization employing statistical design of experiments

Victor Hugo Camargo Suarez¹, Diego Andrés Acosta Maya², Juan Manuel Jaramillo O^{1}*

¹Electromagnetismo Aplicado. Escuela de Ciencias y Humanidades. Ingeniería Física. Universidad EAFIT. Cra 49 7 Sur 50, Av. Las Vegas. Medellín, Colombia.

²Grupo de Investigación DDP. Departamento de Ingeniería de Procesos. Escuela de Ingenierías. Universidad EAFIT. Cra 49 7 Sur 50, Av. Las Vegas. Medellín, Colombia.

Resumen

La caracterización y control de los procesos asistidos por plasma, se ha convertido en una necesidad cada vez más apremiante en el contexto industrial. Una de las técnicas más versátil y económica es la espectroscopia por métodos electrostáticos. En este trabajo se planteó el diseño y construcción de un sistema de caracterización de plasmas fríos por métodos electrostáticos (Sonda de Langmüir), basado en los conceptos de la física de plasmas y herramientas propias de la ingeniería como diseño estadístico de experimentos y el diseño conceptual. El resultado de éste trabajo consistió en el diseño conceptual, la construcción de una sonda y la verificación experimental del funcionamiento de la misma, en un reactor de plasma empleando diseño de experimentos.

----- *Palabras Clave:* Plasma, sonda de langmuir, diseño conceptual, física de plasmas, diseño estadístico de experimentos

Abstract

The characterization and control of plasma-assisted processes, has become increasingly urgent to adapt this kind technology to industrial contexts. This work presents the design and construction of a cold plasma characterization system by electrostatic means (Langmuir probe), based on concepts of plasma physics and tools of engineering, design of experiments and conceptual design. The result of this work is a functional prototype probe and some measurements on the reactor.

----- *Keywords:* Plasma, Langmuir probe, conceptual design, design of experiments, plasma physics

* Autor para correspondencia: teléfono +57 + 4 + 2619500 ext. 9679, correo electrónico: jjaram44@eafit.edu.co (J. Jaramillo)

Introducción

Un plasma es un gas completa o parcialmente ionizado con una densidad igual de partículas cargadas positiva y negativamente, de modo que la carga neta del gas es neutra. Los diagnósticos por plasma se podrían clasificar a muy groso modo en tres categorías: monitoreo remoto pasivo, no contacto activo y contacto [1, 2]. El primero es especialmente empleado para estudiar los plasmas astrofísicos como los generados por el sol o más ampliamente por las estrellas. El método de no contacto activo es ampliamente aplicado a plasmas geofísicos como la ionósfera y los métodos de contacto son aplicados a plasmas interplanetarios, ionósfera, pero también a los plasma fríos de laboratorio. Entre estos últimos, las pruebas electrostáticas son sin duda los más ampliamente utilizados. En este trabajo se limitará la aplicación de las pruebas a plasmas fríos de laboratorio. Básicamente, la sonda electrostática es un objeto conductor insertado dentro del plasma y conectado al mundo externo a través de algún tipo de circuito eléctrico. Los dos requisitos fundamentales de la prueba es que esta debe ser capaz de permanecer inmersa en el plasma sin dañarse y el segundo es que ella no debe alterar el estado global del plasma. Las características que se pueden obtener del plasma con la sonda son la densidad de plasma, la temperatura electrónica y el potencial de plasma. El resultado de este trabajo consistió en la construcción de una sonda doble empleando el diseño conceptual y, una verificación mediante diseño de experimentos del funcionamiento de la misma en un reactor de plasma asistido por microondas, construido en el laboratorio.

Estado del arte

Durante los últimos años, la tecnología de procesos asistidos por plasmas fríos se ha convertido gradualmente en uno de los motores de la innovación tecnológica y ha cobrado una gran importancia en una amplia gama de aplicaciones industriales [3]. La adaptación y control de esta tecnología requiere un profundo conocimiento

sobre las características de los procesos. En este sentido, las sondas electrostáticas son uno de los medios de caracterización más utilizados, por la relativa simplicidad en la implementación y la gran cantidad de información que es posible obtener a partir de ella [2]. El uso de sondas electrostáticas para caracterización de gases ionizados fue implementado por primera vez por el físico Irving Langmuir en el año 1924 en sus trabajos con emisión termiónica. Tanto la invención y el método de caracterización de plasmas fueron patentados [4] en el año 1969. En este documento se establecieron formalmente las bases teóricas y prácticas para la implementación de este tipo de dispositivo. En todos los sistemas de caracterización por sonda electrostática pueden identificarse tres componentes fundamentales: sonda (o sensor), circuito de polarización y procesamiento de datos (o interfaz con usuario). Sobre estos elementos giran las discusiones presentadas por la literatura [5].

A nuestro mejor saber y entender, hasta el momento no se ha reportado una metodología de diseño específica para el desarrollo de estos componentes, ni una validación, por lo menos funcional, de los resultados obtenidos con la sonda a partir de diseño estadístico de experimentos. En este trabajo se implementa la metodología de diseño conceptual para la construcción de una sonda doble de Langmuir y su validación funcional haciendo uso del diseño estadístico de experimentos.

Se aconseja utilizar una sonda doble de Langmuir para medir los parámetros de plasma en vez de la sonda simple cuando se busca más precisión en las medidas, pero especialmente cuando es difícil definir el electrodo de referencia o el potencial del plasma es pobremente definido [6]. El arreglo de la doble sonda permite determinar la temperatura cinética y la densidad numérica de los electrones aunque no de una medida del potencial del plasma. La sonda doble de Langmuir, funciona insertando dos electrodos polarizados con un potencial conocido dentro del gas ionizado. La corriente colectada por el electrodo(s) será la portadora de la información del sistema [3].

Dado que la superficie de la sonda esta polarizada con un voltaje, esta generará un movimiento de las partículas cargadas que se encuentran a su alrededor, atrayendo a su superficie las partículas de signo contrario al potencial de polarización, este efecto genera una corriente de la forma como se indica en la ecuación (1).

$$I_s = A_s v \rho \quad (1)$$

Dónde: A_s corresponde al Área de la sonda, v a la velocidad de las cargas y ρ es la densidad de partículas. Esta expresión se transforma en la ecuación (2):

$$I_s = A_s e \sqrt{\frac{kT_e}{2m\pi}} n_0 e^{\frac{e\phi}{kT_e}} \quad (2)$$

Donde: ϕ corresponde al potencial eléctrico que está definido por el voltaje de plasma V_p y el voltaje aplicado a la sonda V_s , ambos voltajes dependen del número de electrodos y la forma en la cual estos están distribuidos en la región de plasma. Realmente este es el potencial dado por la ecuación de Poisson y hace referencia a las cargas que están modificando la región espacial donde se encuentran y depende con el inverso de la distancia. Además, e es la carga del electrón, m la masas, k la constante de Boltzman (8.617×10^{-5} eV K⁻¹) y T_e la temperatura electrónica del plasma en eV.

La curva característica $I_s - V_s$ es simétrica y limitada a la región entre las corrientes de saturación de cada una de las prueba, como se presenta en la figura 1 donde se indica la región de saturación iónica ($I_{s, \text{iónico}}$) y la región de saturación electrónica ($I_{s, \text{electrónica}}$). La corriente en la sonda viene dada por I_s y V_s es el potencial aplicado a la sonda doble. V_s es la diferencia de potencial aplicado entre los dos electrodos, V_{s1} potencial aplicado al electrodo 1 y V_{s2} potencial aplicado al electrodo 2.

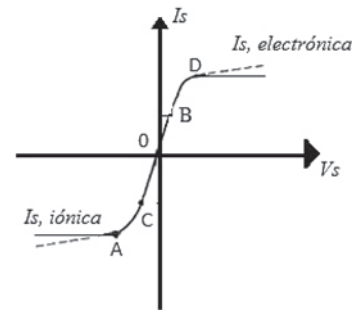


Figura 1 Curva característica de la sonda doble de Langmüir

La simetría de la curva característica está relacionada con la semejanza de los electrodos y su posición en el plasma. Si el potencial en los dos electrodos es igual, no circulará ninguna corriente entre estos, se puede decir que ambas sondas adquieren un potencial fluctuante y se comportan como un material aislante. Está condición corresponde al punto cero de la figura 1. La otra situación posible es que $V_{s1} < V_{s2}$. En este caso el electrodo número uno esta polarizado con un potencial V_{s1} menor respecto al electrodo número dos polarizado con un potencial V_{s2} . En esta condición la corriente total fluirá en dirección a la sonda numero uno y su magnitud será la suma tanto de la corrientes iónica como la corriente electrónica. Esta situación se presenta en el punto B, en la curva característica de la figura 1. La corriente sobre la sonda numero uno es simétrica a la corriente sobre la sonda numero dos solo que con dirección opuesta. Además, cuando $V_{s1} < V_{s2}$, el electrodo número uno esta polarizado con un potencial V_{s1} cercano al potencial del plasma y menor respecto al electrodo número dos polarizado con un potencial V_{s2} , bastante negativo. El electrodo número uno solo colecta electrones. En esta condición mitad de los electrones que llegan al electrodo no pasan por el circuito externo en dirección al electrodo dos. Luego, el sistema se localiza en el punto A de acuerdo con la figura 1.

El análisis de la curva característica se facilita si se cumplen las siguientes hipótesis:

- Cuasi neutralidad del plasma ($n_e = n_i$). Esto posibilita medir la densidad de electrones a partir de la corriente iónica en el punto de inflexión de la curva característica.
- Diámetro de la sonda es menor que el libre camino medio de las especies cargadas e despreciable frente a las dimensiones del plasma.
- El radio de la sonda es mayor que la longitud de Debye.
- La temperatura electrónica es mucho mayor que la temperatura iónica (iones positivos).
- Existe una distribución Maxwelliana de velocidades de los electrones y de los iones, lo que permite medir la temperatura iónica y electrónica, sin que sean modificadas por la presencia de la sonda.
- La corriente colectada del plasma es suficientemente pequeña, que ella no altera las propiedades del plasma en la frontera de la sonda.

Si $V_{s1} < V_{s2}$, la sonda número uno estará polarizada con un potencial V_{s1} menor respecto a la sonda número dos, polarizada con un potencial V_{s2} . Para estas condiciones la corriente total I_T fluirá en dirección a la sonda número 1 y su magnitud será la suma tanto de las corrientes iónicas, i_{i1} , como electrónicas i_{e1} , tal como se indica en la ecuación (3).

$$I_T = i_{i1} - i_{e1} = -(i_{i2} - i_{e2}) \quad (3)$$

Si se sustituye la ecuación (2) en la (3) se encuentra la ecuación (4).

$$I_T = i_{i1}(V_{s1}) - i_{e,saturación} e^{\frac{eV_{s1}}{KT_e}} = - \left(i_{i2}(V_{s2}) - i_{e,saturación} e^{\frac{eV_{s2}}{KT_e}} \right) \quad (4)$$

Si se deriva la primera de las desigualdades de la ecuación (4) con respecto a V_s , y teniendo

en cuenta que $V_{s1}(V_s) = V_{s2}(-V_s)$ se encuentra la ecuación (5).

$$\frac{dI_T}{dV_s} = \frac{di_{i1}}{dV_s} - \frac{i_{e,saturación} \frac{eV_{s1}}{KT_e}}{2} \quad (5)$$

Los diferentes términos de la ecuación (5) se obtienen siguiendo el siguiente procedimiento:

- $\frac{dI_T}{dV_s} \Rightarrow$ Este término puede extraerse de la pendiente de la curva $I_s - V_s$, donde el $V_{s1} = V_{s2}$.
- $\frac{di_{i1}}{dV_s} \Rightarrow$ Este término se obtiene extrapolando la Región A de la curva I_s vs V_s , hasta $i=0$.
- Se puede extraer T_e despejando este término de la ecuación (5).
- Finalmente y conociendo T_e se puede encontrar n_e de la región de saturación de la curva $I_s - V_s$.

En este trabajo, teniendo en cuenta la teoría presentada y el tipo de reactor sobre el cual se realizaron las medidas, se procedió a implementar la metodología de diseño conceptual, con el fin de generar propuestas de diseño acordes con los requerimientos técnicos del sistema en base a la información disponible. Posteriormente con una propuesta de diseño solida se procedió a la implementación y validación de funcionalidad del dispositivo.

Diseño conceptual

El punto de partida para el diseño conceptual [7] de un sistema de caracterización por sonda doble de Langmuir, consiste en acotar los requerimientos técnicos y de usuario del dispositivo, en relación al contexto en el cual esta va a ser usada. Para este fin se construye un PDS (Product Design Specification) como se indica en la Tabla 1, con el fin de definir lo que se necesita y lo que se desea del instrumento que se pretende diseñar. A partir de esta información es posible extraer los requerimientos técnicos del dispositivo tabla 1.

Tabla 1 Demandas y deseos para la sonda de Langmüir y los requerimientos exigidos

Especificaciones de diseño de producto	
Demanda (D)/ Deseo(d)	Requerimiento
El producto debe ser fácil de transportar (D)	Construcción Modular, Bajo Peso
Debe funcionar con la energía eléctrica disponible de la red (D)	110 Voltios / 60 hz
El producto debe ser compatible con cualquier sistema de computo (D)	Usar protocolos de comunicación estándar (RS 232, USB)
Resolución de mV (D)	Resolución del orden de ± 4 mV
Posibilidad de Variación de Frecuencia	Ancho de banda que permita variaciones de frecuencia
Materiales de la sonda Resistentes a las condiciones del Plasma	Materiales de altos puntos de fusión > 1200 K
Materiales de la sonda deben conducir la corriente con facilidad (D)	Baja resistividad eléctrica < 1 Ω
Debe ser poco influenciada por señales externas (D)	Alta relación señal ruido, Filtrado de señales parasitas
El sistema debe tener la potencia suficiente para realizar la medida (D)	Corriente > 500 mA , Voltaje > ± 20 V
La interface debe permitir realizar medidas de manera rápida (d)	Interface de fácil uso, Instrucciones de uso
Fácil reparación y modificación del sistema (d)	Piezas estándar y disponibles con facilidad en el mercado local

Requerimientos técnicos		
Requerimientos	Mínimo	Máximo
Resistividad Eléctrica (Ω mm ² / m)	5x10 ⁻⁹	5x10 ⁻⁷
Temperatura de Fusión (K)	1300	---
Voltaje de Alimentación (V)	± 16	± 100
Corriente Disponible (mA)	---	900
Ruido de las Fuentes (mV)	---	16
Amplitud Señal Rampa (V)	± 0.1	± 10
Frecuencia Señal Rampa (Hz)	10	100
Relación Señal Ruido (adim.)	---	0.04

El siguiente paso en el proceso de diseño consiste en el análisis de los flujos que circulan por el sistema y extraer de la función total del

dispositivo una estructura funcional que permita abstraer sus componentes a entidades más básicas como se presenta en la figura 2.

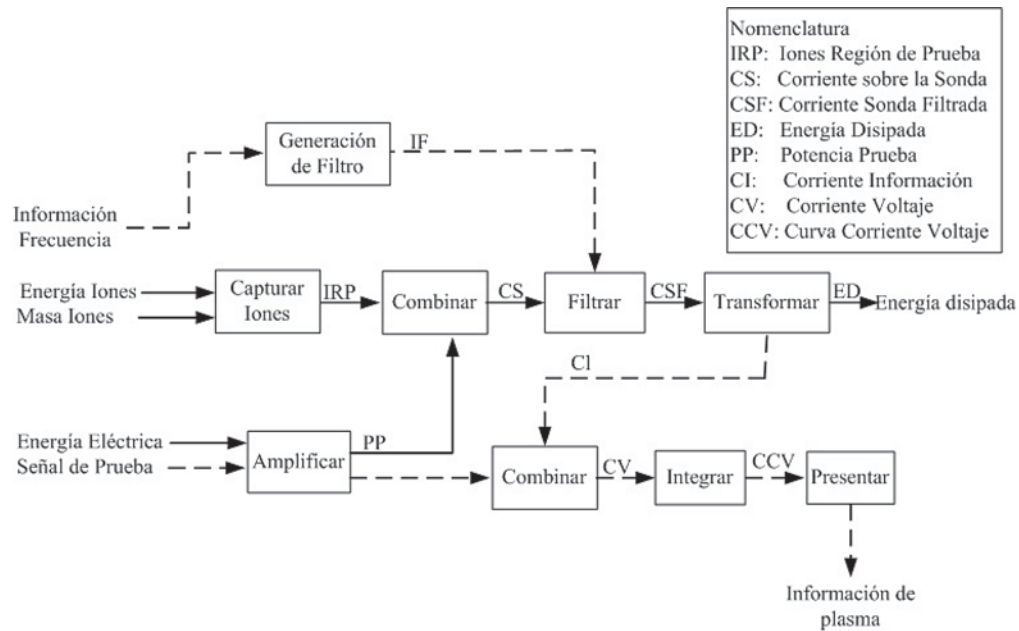


Figura 2 Estructura Funcional del sistema de caracterización del reactor plasma

De esta estructura funcional es posible hacer una asociación de componentes que cumplen funciones cercanas posibilitando la división del sistema en subsistemas o portadores de función,

ver figura 3. Estos subsistemas pueden analizarse por separado para entender de manera más clara el comportamiento y relaciones entre los flujos que lo atraviesan.

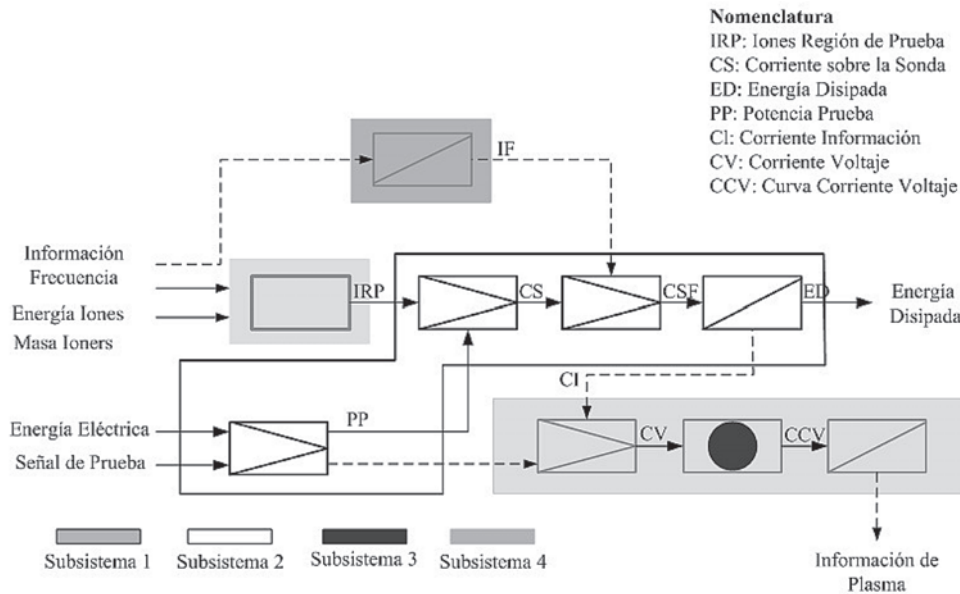


Figura 3 División en Subsistemas o Portadores de Funciones

- El subsistema 1 corresponde específicamente a la sonda. Es el material encargado del contacto con el plasma y de la captura de las partículas cargadas, su función depende directamente de la geometría y el material.
- El subsistema 2 transforma la información ya conocida del plasma en información útil que permita filtrar la información obtenida por la sonda.
- El subsistema 3 consiste en el circuito eléctrico encargado de polarizar la sonda y coleccionar la corriente, su función depende de

las características de los componentes usados para su construcción.

- El subsistema 4 es el encargado de recopilar, computar y presentar los datos al usuario.

Una vez identificada la forma en la que el flujo circula por el sistema, el siguiente paso consiste en seleccionar los portadores de función para cada uno de los subsistemas. La información de los posibles portadores de función es extraída de la revisión del estado del arte. En la tabla 2 se presenta el resumen de los posibles portadores de función.

Tabla 2 Matriz Morfológica de los portadores de función

Subsistema	Portador			
Colección de Cargas	Cilíndrica		Rectangular	Plana
	Tungsteno		Cobre	Molibdono
Filtrado de Señal	Filtro Activo		Filtro Pasivo	Filtrado por Software
Circuito de Polarización	Amplificadores de Audio		Amplificadores de Instrumentación	
Adquisición de Datos	Microcontrolador	Sound Card	Tarjeta de Adquisición de datos	Osciloscopio digital

Tabla 3 Parámetros de Selección

Parámetro	Significancia	Elemento Material			
		Tungsteno	Cobre	Molibdono	
Conductividad	5%	3	5	3	
Temperatura de Fusión	5%	4	3	5	
		Geometría			
		Cilíndrica	Rectangular	Plana	
Implementación	10%	5	2	2	
		Filtro			
		Filtro Activo	Filtro Pasivo	Filtrado por Software	
Implementación	10%	4	4	5	
		Amplificador			
		Amplificadores de Audio		Amplificadores de Instrumentación	
Costo	20%	5		2	
Precisión	10%	3		5	
		Adquisición de Datos			
		Microcontrolador	Sound Card	Tarjeta de Adquisición de datos	Osciloscopio digital
Ancho de Banda	5%	2	3	4	5
Implementación	5%	3	1	5	5
Costo	20%	5	5	2	1
Resolución	10%	2	2	4	5

Finalmente a partir de la información de los portadores de función, es posible establecer criterios de selección de portadores que lleven a la construcción del dispositivo con una mayor eficiencia. En este caso se definieron estos criterios en base a: las necesidades técnicas del dispositivo, la disponibilidad de los elementos de construcción y costo de los mismos. La importancia de los parámetros (significancia) se estableció en porcentajes, y portadores de función fueron calificados en escala de 1 a 5, siendo 5 la mejor opción. Esta información se presenta en la tabla 3.

A partir de estos parámetros y de la calificación de cada uno de los elementos, se seleccionó la solución más adecuada para la construcción de la sonda que en este caso fue [8]: Una sonda construida de cobre, con geometría cilíndrica, el filtrado de la señal por software, para amplificación de señal se uso un amplificador de audio y para la colección de datos y comunicación, se uso un microcontrolador.

Materiales y métodos

Sonda: La sonda que se implemento se presenta en la figura 4, y consiste en un par de cilindros de cobre de 0.61 mm de diámetro, encapsulados individualmente en capilares de vidrio. Los capilares fueron introducidos en un tubo vidrio de diámetro mayor, 3mm. Para garantizar el aislamiento electromagnético fue usada una lámina de aluminio ubicada en la cara interna del tubo de vidrio.

Circuito de Polarización: La implementación del circuito de polarización se realizó usando el amplificador LM3886 en su configuración típica, con una ganancia de 1:20 y desactivando su función de Mute. Se alimentó el circuito con un voltaje de $\pm 40V$ y como señal de entrada una función rampa con una frecuencia de 20Hz y voltaje pico a pico de 2V. La salida de este amplificador fue usada como voltaje de polarización de una de las sondas. Para medir la corriente se empleó una resistencia de carga de 560Ω conectada entre una de las sondas y la tierra del circuito de polarización.

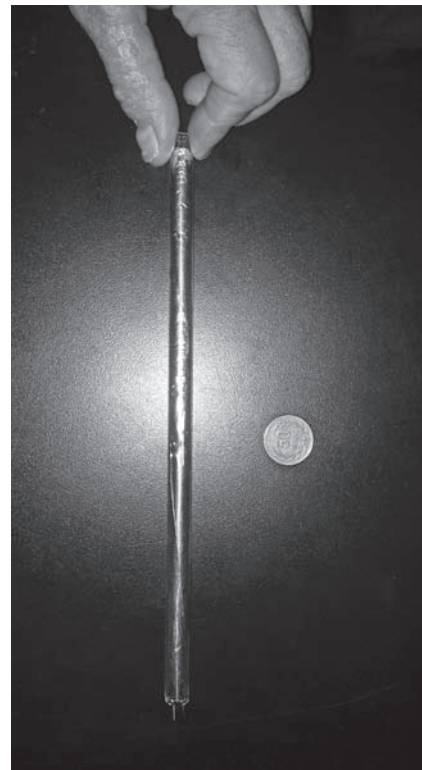


Figura 4 Sonda de Langmuir implementada

Para garantizar el aislamiento eléctrico del sistema fueron usados dos amplificadores de aislamiento AD202 configurados en modo de ganancia unitaria, ubicados entre la señal de entrada y la salida de la resistencia de carga.

Recolección y Procesamiento de Datos: Para la recolección de datos fue usado un conversor analógico digital de 10 bits integrado en un micro controlador de la serie PIC16F876a fabricado por la compañía Microchip. Este conversor consigue resolver valores en el rango entre 0–5V. Por lo tanto, para resolver valores con polaridad negativa es necesaria una etapa extra que permita agregar un offset a la señal. Esta etapa fue implementada haciendo uso de amplificadores operacionales.

Para garantizar una buena frecuencia de muestreo y la adquisición simultanea de los datos, se emplearon dos microcontroladores sincronizados entre sí por la misma señal de disparo y la misma señal de reloj. La figura 5, presenta el esquemático del circuito realizado.

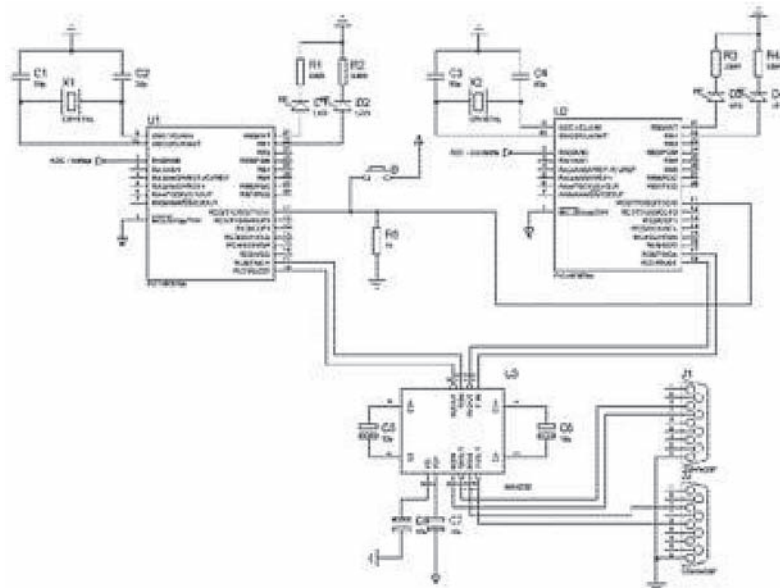


Figura 5 Circuito de adquisición de datos y comunicación con el mundo externa

La lectura de los datos obtenidos se realizó por medio de una interface en LabView® que se encarga de leer estos del puerto serial y enviarlos a un archivo de texto en formato estándar. Para la interpretación y tratamiento de los datos se usó el software R en su versión 2.13 para la plataforma Windows®.

Reactor de Plasma: El equipo empleado para validar el funcionamiento del sistema de caracterización, consiste en un reactor de proceso basado en un horno microondas convencional, al cual fue adaptado una cúpula de borosilicato en la parte interna y una zona de proceso, construida de acero inoxidable en su parte inferior. La información detallada de este sistema se encuentra en la patente en trámite de modelo de invención 10-027016 COL. Este sistema cuenta con un Mass Flow Sierra 810 para el control de ingreso de gases a la cámara. Para la extracción de masa cuenta con una bomba mecánica Edwards y para la medición de la presión cuenta con un sensor pirani.

Métodos Experimentales: Para corroborar el buen funcionamiento de la sonda es necesario realizar algunas medidas, y dado que no se cuenta

con otro sistema de referencia, se empleó un test de hipótesis apoyado en el diseño estadístico de experimentos, el cual se presenta a seguir.

Diseño Factorial Completo 2^k

El objetivo es comprobar que al variar algunos de los factores, efectivamente la medida se ve afectada. Para realizar el tratamiento tomaremos como factores controlables, la presión (P) y el voltaje de prueba (V_p) y como factor dependiente la temperatura electrónica (T_e). Estos factores son remplazados en el modelo de diseño de experimentos 2^2 con el propósito de contrastar las siguientes hipótesis nula y alterna para cada uno de los factores involucrados (presión y voltaje):

$$H_0: P=0, V=0$$

$$H_A: P, V \neq 0$$

Es decir, en la hipótesis nula H_0 la presión y el voltaje no varían mientras que en la hipótesis alterna H_A presión y voltaje varían. Para cada uno de los tratamientos se realizaron 4 replicas aleatorias implicando finalmente 16 corridas del sistema para obtener la información necesaria.

La presión del sistema se definió como Factor A y voltaje de prueba como Factor B, los niveles son presentados en la tabla 4.

Tabla 4 Factores y niveles del experimento

Factor/Nivel	+1	-1
A	$5.5 \times 10^{-1} Torr$	$3.5 \times 10^{-1} Torr$
B	$\pm 40V$	$\pm 30V$

Análisis de resultados

Con relación a la Sonda: Para este elemento se realizaron mediciones cuantitativas de resistividad y de estabilidad dimensional en puntos estratégicos de la sonda (región de contacto con el plasma, conexión con el circuito de medida), antes y después de cada una de las corridas del experimento. Esto con el fin de comprobar que efectivamente luego de

cada medida estos valores permanecen constantes. Los valores iniciales de resistencia y diámetro antes de iniciar los experimentos y después de los mismos se mantuvieron, es decir la resistencia de la sonda permaneció en 0.06Ω y el diámetro de la misma en 0.61 mm .

Con relación al circuito de polarización: Para este elemento se realizaron medidas cuantitativas de ganancia y comparaciones cualitativas de la distorsión de la señal, estos controles se realizaron para ambos amplificadores. Para estas medidas fue usado un generador de señal Agilent 33220A y un osciloscopio digital Fluke 125. Para el amplificador de potencia LM3886 se obtuvieron los resultados presentados en las figuras 6 (a) y (b) respectivamente. De las medidas realizadas se concluyó que el sistema posee una relación de ganancia de aproximadamente $1:20 \pm 0.6\%$.

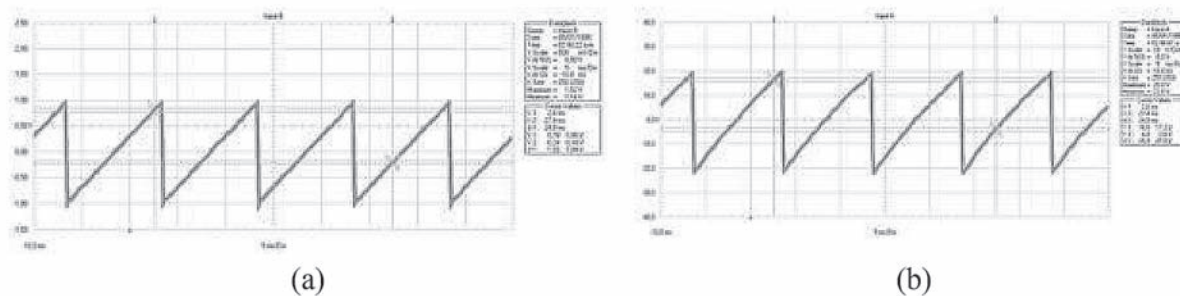


Figura 6 (a) Entrada Amplificador LM3886 - 1V PP 80 Hz y (b) Salida Amplificador LM3886 - 20V PP 80 Hz

Para el amplificador de aislamiento AD202 se obtuvieron los resultados presentados en la figura 7 (a) y (b) respectivamente. De las medidas realizadas se concluyó que esta parte del sistema posee una relación de ganancia de aproximadamente $1:1 \pm 0.2\%$.

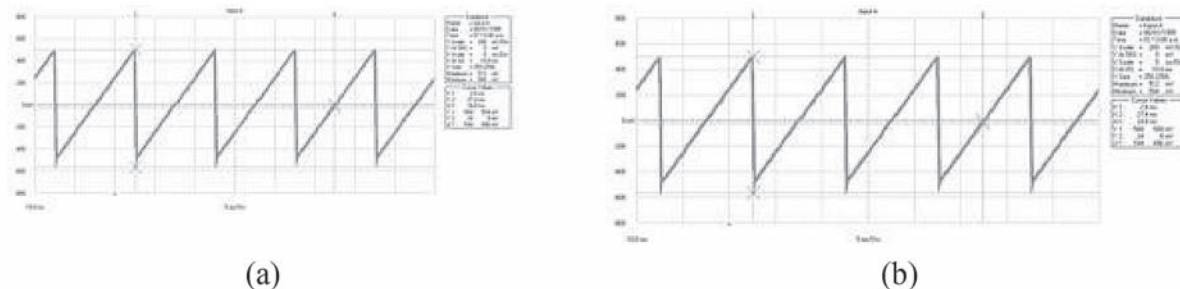
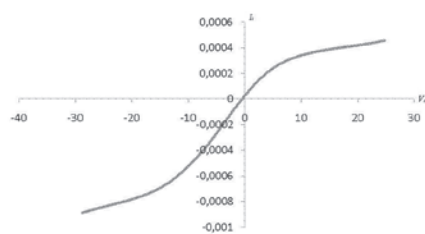


Figura 7 (a) Entrada Amplificador AD202 – 500V PP 80 Hz y (b) Salida Amplificador AD202 – 500V PP 80 Hz

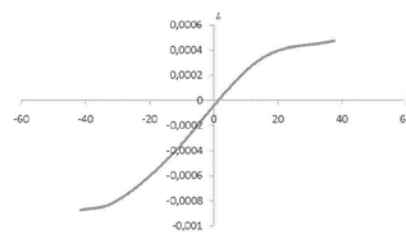
Sistema de recolección y procesamiento de dato: Se realizaron medidas cuantitativas de tiempo de respuesta. Para este fin se ingresaron al sistema señales sinusoidales con frecuencias de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 y 80Hz usando un generador de señales Agilent 33220A y posteriormente se calculó el número de muestras entre cada uno de los periodos de la señal. Para este elemento se obtuvo un tiempo respuesta promedio de 4.42 ms con una desviación estándar de 0.044ms. Según el Teorema de Nyquist el ancho de banda del sistema es 113,12Hz, sin embargo este mismo teorema predice que para reconstruir una señal son necesarias 10 muestras por periodo, por lo tanto el sistema es capaz de reconstruir señales de hasta 22.6Hz.

Reactor de plasma: La cámara de plasma fue evacuada hasta alcanzar una presión de fondo

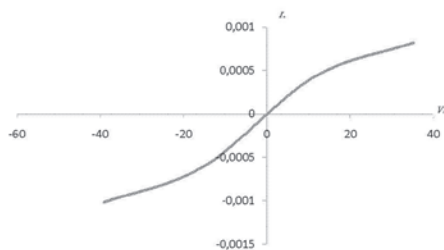
de $7,8 \times 10^{-3}$ Torr, posteriormente se estableció un flujo de argón hasta alcanzar una presión de 3.5×10^{-1} Torr (flujo 10 sccm) y 5.5×10^{-1} Torr (flujo de 20 sccm) respectivamente. La potencia fue aplicada al sistema durante 20 segundos y en cada una de las medidas ésta se mantuvo constante. La sonda fue ubicada dentro del reactor, cerca de una de las paredes de la cámara, esta fue mantenida en la misma posición durante todas las medidas. La sonda fue polarizada con voltajes que se variaron entre $\pm 30V$ y $\pm 40V$. Las curvas obtenidas son semejantes a las reportadas en la literatura, figura 9 (a) y (b), sin embargo, en algunos de los tratamientos no se alcanza a explorar la región de saturación, como por ejemplo los tratamientos a^1b^1 y a^0b^0 mostrados en la figura 8 (a) y (b) respectivamente.



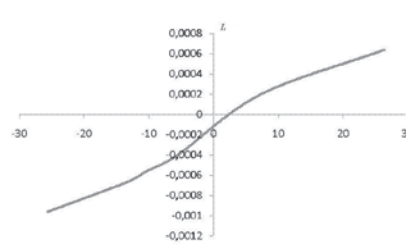
(a) Tratamiento a^1b^0



(b) Tratamiento a^0b^1



(a) Tratamiento a^1b^1



(b) Tratamiento a^0b^0

Figura 8 Curva de I_s vs V_s para diferentes tratamientos

Este efecto es debido a que el voltaje de polarización de las sondas en ese caso no fue lo suficientemente alto para alcanzar estas regiones.

A partir de los resultados se realizó el test de hipótesis, de acuerdo con la tabla 5. En este experimento se tienen tres grados de libertad para cada tratamiento

Tabla 5 Factorial 2² Sonda de Langmuir

Tratamientos	Factores		Replicas				Promedios	Desviación
	A	B	1	2	3	4		
1	1	-1	7,49x10 ⁴	8,22x10 ⁴	8,31x10 ⁴	7,81x10 ⁴	7,96x10 ⁴	3,8x10 ³
2	-1	1	1,26x10 ⁵	9,34x10 ⁴	8,25x10 ⁴	1,04x10 ⁵	1,01x10 ⁵	1,9x10 ⁴
3	1	1	4,38x10 ⁴	3,44x10 ⁴	6,22x10 ⁴	5,12x10 ⁴	4,79x10 ⁴	1,2x10 ⁴
4	-1	-1	9,4x10 ⁴	1,15x10 ⁵	8,45x10 ⁴	9,21x10 ⁴	9,65x10 ⁴	1,3x10 ⁴

Los efectos estandarizados están presentados en el gráfico de Pareto, con un coeficiente de confianza α del 5.0% en la figura 9.

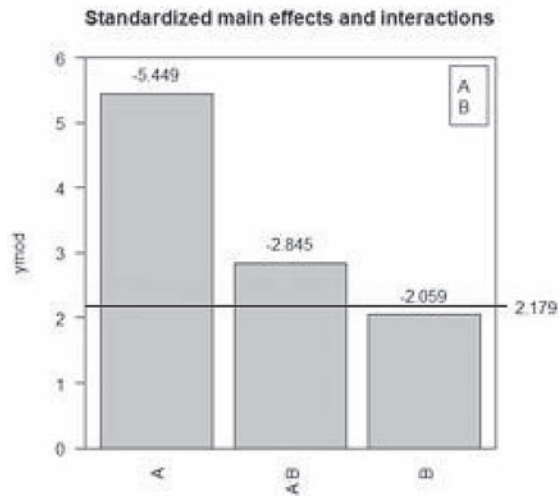


Figura 9 Gráfico de Pareto en el que se presentan los efectos estandarizados y las interacciones

Del gráfico de Pareto es posible concluir:

- El único factor que presenta efectos significativos sobre el sistema en este caso es el A, que corresponde a la presión del sistema.
- El factor B no es significativo estadísticamente.
- La interacción entre A y B combinados (AB), es estadísticamente significativa. No obstante esto puede deberse a la alta dependencia a la presión (A).

Conclusiones

El modelo matemático del diseño de experimentos fue usado para la interpretación de los datos y arrojó resultados plausibles en las medidas de temperatura electrónicas del sistema (i.e., la temperatura electrónica es altamente dependiente de la presión). Es necesario profundizar en la interacción entre la presión y el voltaje aplicados a la sonda para minimizar ésta en la medición de la temperatura electrónica. Aunque estos resultados no fueron corroborados con otros métodos, el test de hipótesis planteado valida el comportamiento predicho por el modelo a la luz de la física del plasma.

La implementación del sistema de adquisición de datos basada en micro-controladores mostró resultados aceptables para esta aplicación a un costo considerablemente bajo comparado con otro tipo de soluciones.

La implementación del sistema de amplificación basada en amplificadores de audio convencionales, presentó resultados satisfactorios para la aplicación, sin embargo, estos están limitados por su potencia de trabajo, haciendo que su uso este limitado para sistemas de plasma de baja potencia.

El diseño conceptual permitió abordar el sistema como un todo y encontrar una solución al problema planteado, optimizando los costos sin sacrificar los requerimientos técnicos del dispositivo, esta técnica podría ser utilizada para el futuro diseño de sistemas de sonda electrostática más específicos.

Referencias

1. R. Merlino. "Understanding Langmuir probe current-voltage characteristics". *American Journal Physics*. Vol. 75. 2007. pp. 1078-1085.
2. V. Demidov, S. Ratynskaia, K. Rypdal. "Electric probes for plasmas: The link between theory and instrument". *Review of scientific instruments*. Vol. 73. 2002. pp. 3409-3439.
3. J. Roth. "Industrial plasma engineering": Industrial plasma engineering. Vol. 2. Ed. IOP Publishing. London, England. 2003.
5. J. Grey. "Method and device for determining properties of an ionized gas". US. Patent No. 3459039. August 5, 1969.
6. A. Azooz. "Analog Data Acquisition for Obtaining I-V Characteristics Using Sound Cards. *Computing in Science and Engineering*. Vol. 8. 2006. pp. 10-15.
7. R. Carnile, T. Ariz, S. Ghea. "Langmuir probe system for radio frequency excited plasma processing system". U.S. Invention patent No. 5339039. August 16, 1994.
8. G. Rodríguez. *Artefactos: Diseño Conceptual*. Ed. Universidad EAFIT. Medellín, Colombia. 2003.
9. V. Camargo, J. Jaramillo. *Implementación de un Sistema de Caracterización de Plasma por Sonda de Langmuir*. Ed. Universidad EAFIT. Medellín, Colombia. 2010.