

Implementación de un Sistema de Caracterización de Plasma por Sonda de Langmüir

Víctor Hugo Camargo Suarez

Trabajo de Grado presentado para optar al título de
Ingeniero Físico

Asesor

Juan Manuel Jaramillo Ocampo

Universidad Eafit

Escuela de Ciencias y Humanidades

Departamento Ciencias Básicas – Ingeniería Física

Medellín

2010

A quienes tuvieron fe en mí, cuando yo mismo no la tenía.

Índice General

| | |
|---|----|
| Introducción | 9 |
| Objetivos | 10 |
| Capitulo 1 | 11 |
| Marco Teórico | 11 |
| 1.1. Plasmas | 11 |
| 1.2 Técnicas de Caracterización de Plasmas | 13 |
| 1.2.1 Espectroscopia Óptica | 14 |
| 1.2.1.1 Espectroscopia Óptica de Emisión | 14 |
| 1.2.1.2. Espectroscopia Óptica de absorción..... | 16 |
| 1.2.2. Sondas Electroestáticas..... | 16 |
| 1.2.2.1. Sonda Simple | 18 |
| 1.2.2.2. Sonda Doble | 21 |
| 1.3. Estado del Arte | 24 |
| 1.3.1. Sonda | 25 |
| 1.3.2. Circuito de Polarización | 28 |
| 1.3.3. Recolección y procesamiento de datos | 30 |
| Capitulo 2 | 33 |
| Materiales y Métodos | 33 |
| 2.1. Método de Diseño..... | 33 |
| 2.1.1. Diseño Conceptual..... | 33 |
| 2.1.2. Especificaciones de Diseño de Producto..... | 34 |
| 2.1.3. PDS | 35 |
| 2.1.4. Requerimientos Técnicos | 35 |
| 2.1.4.1 Requerimientos desde los Materiales..... | 35 |
| 2.1.4.2. Requerimientos desde La Potencia..... | 36 |
| 2.1.4.3. Requerimientos desde La Señal | 37 |
| 2.1.5. Estructura Funcional | 37 |
| 2.1.5.1. Subsistema 1..... | 40 |
| 2.1.5.2. Subsistema 2..... | 41 |

| | |
|--|----|
| 2.1.5.3. Subsistema 3..... | 41 |
| 2.1.5.4. Subsistema 4..... | 44 |
| 2.1.6. Matriz Morfológica | 45 |
| 2.1.7 Alternativas de Solución..... | 46 |
| 2.1.8 Parámetros de selección..... | 48 |
| 2.2 Materiales..... | 49 |
| 2.2.1. Sonda..... | 49 |
| 2.2.2. Circuito de Polarización | 50 |
| 2.2.3. Recolección y Procesamiento de Datos | 51 |
| 2.2.4. Sistema Caracterizado..... | 52 |
| 2.3. Métodos Experimentales..... | 53 |
| 2.3.1 Diseño Factorial Completo 2k | 53 |
| 2.3.2. Medidas Realizadas | 54 |
| Capitulo 3 | 56 |
| Resultados Experimentales..... | 56 |
| 3.1. Caracterización de los elementos individuales | 56 |
| 3.1.1. Sonda..... | 56 |
| 3.1.2. Circuito de Polarización | 57 |
| 3.1.3. Recolección y Procesamiento de Datos | 63 |
| 3.2 Resultados de las Medidas Realizadas..... | 65 |
| 3.2.1. Resultados | 65 |
| 3.2.1.1. Test de Hipótesis | 68 |
| 3.2.2. Curvas obtenidas | 69 |
| Capitulo 4 | 72 |
| Conclusiones y Trabajos Futuros | 72 |
| 4.1 Conclusiones..... | 72 |
| 4.2 Trabajos Futuros..... | 73 |
| Bibliografía | 74 |
| Anexos | 76 |

Lista de Ilustraciones

| | |
|---|----|
| <i>Ilustración 1: Reactor de Sputtering SIU - Universidad de Antioquia</i> | 11 |
| <i>Ilustración 2: Clasificación de las posibles técnicas espectroscópicas (Rodrigo, 2004)</i> . | 14 |
| <i>Ilustración 3: Espectro típico (Cu/steel, oil, 12 A, 2 s on-time) (Antoine Descoedres, 2004)</i> | 15 |
| <i>Ilustración 4: Esquema Sonda</i> | 16 |
| <i>Ilustración 5: Sonda Inmersa en el plasma</i> | 17 |
| <i>Ilustración 6: Sonda Simple</i> | 18 |
| <i>Ilustración 7: Curva esquemática I V sonda Simple</i> | 19 |
| <i>Ilustración 8: Sonda Doble</i> | 21 |
| <i>Ilustración 9: Curva esquemática I V sonda doble</i> | 22 |
| <i>Ilustración 10: Esquema del sistema de medida</i> | 24 |
| <i>Ilustración 11: Reflexión de Iones</i> | 26 |
| <i>Ilustración 12: Implantación de los Iones</i> | 26 |
| <i>Ilustración 13: Sputtering</i> | 27 |
| <i>Ilustración 14: Geometría Sondas</i> | 27 |
| <i>Ilustración 15: Aislamiento Sonda</i> | 28 |
| <i>Ilustración 16: Esquema circuito de polarización</i> | 29 |
| <i>Ilustración 17: Modulated Sweep</i> | 30 |
| <i>Ilustración 18: Montaje Experimental Universidad Mosul</i> | 31 |
| <i>Ilustración 19: Modelo de Caja Negra</i> | 34 |
| <i>Ilustración 20: Estructura funcional</i> | 38 |
| <i>Ilustración 21: División en Subsistemas o Portadores de función</i> | 39 |
| <i>Ilustración 22: Subsistema 1</i> | 40 |
| <i>Ilustración 23: Subsistema 2</i> | 41 |
| <i>Ilustración 24: Subsistema 3</i> | 42 |
| <i>Ilustración 25: Subsistema 3.1</i> | 42 |
| <i>Ilustración 26: Subsistema 3.2</i> | 43 |
| <i>Ilustración 27: Subsistema 3.3</i> | 44 |
| <i>Ilustración 28: Subsistema 4</i> | 44 |
| <i>Ilustración 29: Subsistema 4.1</i> | 45 |
| <i>Ilustración 30: Sonda Implementada</i> | 50 |
| <i>Ilustración 31: Sistema Caracterizado</i> | 53 |
| <i>Ilustración 32: Entrada Amplificador LM3886 - 1V PP 80 Hz</i> | 59 |
| <i>Ilustración 33: Salida Amplificador LM3886 - 20V PP 80 Hz</i> | 60 |
| <i>Ilustración 34: Entrada Amplificador AD202 - 500V PP 80 Hz</i> | 61 |
| <i>Ilustración 35: Salida Amplificador AD202 - 500V PP 80 Hz</i> | 62 |
| <i>Ilustración 36: ADC 20Hz</i> | 63 |

| | |
|---|----|
| <i>Ilustración 37: ADC 40Hz</i> | 64 |
| <i>Ilustración 38: ADC 60Hz</i> | 64 |
| <i>Ilustración 39: ADC 80Hz</i> | 65 |
| <i>Ilustración 40: Medida realizada</i> | 66 |
| <i>Ilustración 41: Resultado tratamiento a1b0</i> | 69 |
| <i>Ilustración 42: Resultado tratamiento a0b1</i> | 70 |
| <i>Ilustración 43: Resultados tratamiento a1b1</i> | 70 |
| <i>Ilustración 44: Resultados tratamiento a0b0</i> | 71 |

Lista de Tablas

| | |
|---|----|
| <i>Tabla 1: PDS - Product design specification</i> | 35 |
| <i>Tabla 2: Requerimientos de los materiales</i> | 36 |
| <i>Tabla 3: Requerimientos Circuito de Polarización</i> | 36 |
| <i>Tabla 4: Requerimientos Adquisición de Señal</i> | 37 |
| <i>Tabla 5: Matriz Morfológica</i> | 46 |
| <i>Tabla 6: Alternativa de solución 1</i> | 46 |
| <i>Tabla 7: Alternativas de solución 2</i> | 46 |
| <i>Tabla 8: Alternativa de solución 3</i> | 47 |
| <i>Tabla 9: Alternativa de solución 4</i> | 47 |
| <i>Tabla 10: Parámetros de Selección</i> | 48 |
| <i>Tabla 11: Evaluación alternativa de solución</i> | 49 |
| <i>Tabla 12: Experimentos Realizados</i> | 55 |
| <i>Tabla 13: Medidas diámetro y resistencia</i> | 57 |
| <i>Tabla 14: Factores y Niveles del experimento</i> | 66 |
| <i>Tabla 15: Resultados</i> | 67 |
| <i>Tabla 16: Tabla ANOVA</i> | 68 |

Lista de Símbolos

ϕ - Potencial

n_i - Numero de Iones

n_e - Numero de electrones

n_o - Numero total de particulas

e - Carga Electron

K - Constante Boltzmann

T - Temperatura

m - masa particula

$\langle V \rangle$ - Velocidad Promedio

r - radio

λ_d - Longitud de Debye

A_s - Area Sonda

V_s - Voltaje Plasma

V_p - Voltaje Prueba

V_f - Voltaje Flotante

$I_{e,sat}$ - Corriente electronica de Saturacion

$I_{i,sat}$ - Corriente ionica de Saturacion

I_t - Corriente total

I_e - Corriente electronica

I_i - Corriente ionica



- Conducir



- Transformar



- Unir/Aumentar -
Separar/Disminuir



- Almacenar

Introducción

En las últimas décadas los procesos fundamentados en tecnologías basadas en plasma han cobrado gran importancia para diversas aplicaciones (Roth, 2003). Entre los métodos de caracterización de plasmas, las sondas electrostáticas son uno de los más utilizados, por la relativa simplicidad en la implementación y la gran cantidad de información que es posible obtener a partir de ellas. Sin embargo, la implementación de un sistema como este requiere gran conocimiento tanto del sistema que se desea caracterizar como de la técnica misma.

Una sonda electrostática (o sonda de Langmüir) es un instrumento usado para determinar la temperatura de los electrones, la densidad y el potencial eléctrico del plasma. Funciona insertando dentro del plasma uno o más electrodos polarizados con un potencial conocido, la corriente colectada por estos electrodo(s) es la portadora de la información del sistema.

El desarrollo de las pruebas por sonda electrostática ha estado de la mano del desarrollo de los sistemas de generación de plasma y estos son los que han guiado los posteriores desarrollos de la técnica. Actualmente, este método de caracterización del plasma es usado en una gran variedad de reactores para procesamiento de materiales o para estudios del comportamiento de fenómenos que involucran gases ionizados como: sistemas de “tokamak” (R. Shariatzadeh, 2009), sistemas de abrasión laser (J Wild, 2002), sistemas de magnetron “sputtering” (G.Murakami, 2007), reactores de RF (M.A. Naveed, 2008) y Microondas (A. Brockhaus, 1995) entre otros.

En este trabajo intentaremos seguir paso a paso el proceso de diseño y puesta en funcionamiento de un sistema de caracterización por sonda doble de Langmüir. Para este fin hemos separado el trabajo en cuatro capítulos.

En el primero de los capítulos haremos una revisión de la teoría necesaria para comprender el funcionamiento de una sonda electrostática y realizaremos una pequeña revisión del estado del arte.

En el segundo de los capítulos hemos separado la información en dos secciones, la primera de esta correspondiente a la metodología de diseño y los materiales usados para la construcción. Y una segunda sección correspondiente a la metodología experimental y el sistema involucrado en la medida.

En el tercero de los capítulos presentaremos los resultados experimentales para cada una de las etapas del dispositivo y los resultados obtenidos tras realizar medidas sobre un sistema real.

Finalmente presentaremos una discusión de los resultados y propondremos posibles trabajos futuros en este mismo tema.

Objetivos

Objetivo General

- Implementar un sistema de caracterización de plasmas empleando el método de sonda de Langmüir

Objetivos Específicos

- Definir el modelo teórico de la sonda de Langmüir a partir de la revisión bibliográfica.
- Implementar un circuito de acondicionamiento de señal que permita la recolección adecuada de las señales
- Construir una sonda resistente a las condiciones del plasma
- Determinar la funcionalidad del sistema realizando algunas medidas.
- Establecer un protocolo de análisis de los datos obtenidos

Capítulo 1

Marco Teórico

Introducción

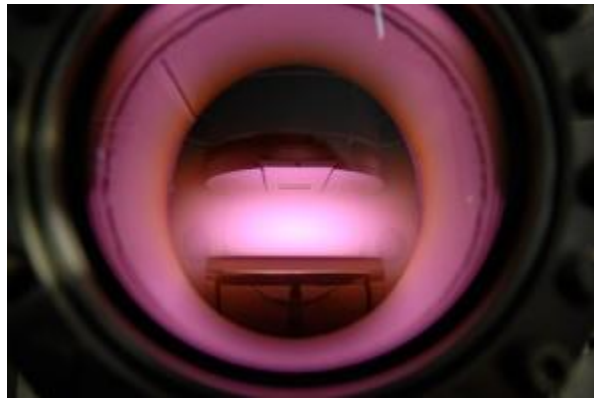


Ilustración 1: Reactor de Sputtering SIU - Universidad de Antioquia

1.1 Plasmas

En física y química se denomina plasma a un gas constituido por partículas cargadas, cuya dinámica presenta efectos colectivos dominados por las interacciones electromagnéticas de largo alcance entre las mismas. Es considerado uno de los estados de agregación de la materia ya que posee características particulares que lo hacen diferente de los demás estados. Una buena definición de plasma podría ser que es un gas cuasi neutral con un comportamiento colectivo.

El comportamiento colectivo puede ser mejor entendido realizando una comparación con partículas no cargadas. Una partícula se mueve libremente en dirección aleatoria hasta colisionar con otra partícula, este choque será el responsable del movimiento futuro de ambas. Si una fuerza macroscópica es aplicada a las partículas, esta se transmitirá entre ellas por colisiones aleatorias. La situación es diferente en plasmas, en donde las partículas individuales se encuentran con una carga total diferente de cero, estas interactúan entre sí de

forma electrostática, si un campo eléctrico es aplicado a estas partículas, estas reaccionarían al campo de forma proporcional al valor de su carga.

La cuasi neutralidad del plasma puede entenderse si se observa desde fuera del sistema. El plasma está constituido por partículas cargadas distribuidas en regiones específicas del espacio. Si observamos estas regiones específicas como un sistema aislado estas tendrían una carga neta diferente de cero, pero si consideramos la suma de todas ellas, la carga neta del sistema es igual a cero haciendo que en su totalidad pueda considerarse como un gas eléctricamente neutro.

Una de las características naturales del comportamiento del plasma, es su habilidad para apantallar los potenciales eléctricos que son aplicados sobre este, a este fenómeno se le conoce como apantallamiento de Debye. Si dentro de un plasma son ubicados un par de electrodos de polaridades opuestas, los iones serán atraídos por el electrodo de carga negativa, mientras que los electrones serán atraídos por el electrodo de potencial positivo, en ambos casos se formará una nube alrededor de los electrodos. Si tenemos un plasma frío en donde la energía cinética de las partículas no fuera muy alta, el apantallamiento sería perfecto y se cumpliría la condición de la no existencia de campo fuera de las nubes de partículas cargadas. Este fenómeno puede derivarse haciendo uso de la ecuación de Poisson:

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = 4\pi e(n_i - n_e) \quad (1.1)$$

Si suponemos que la masa de los iones es considerablemente mayor, es posible asumir que estos permanecen inmóviles comparados con los electrones, frente a la presencia de un potencial y conociendo que la presencia de electrones libres depende de la temperatura del sistema se puede definir:

$$n_i = n_0 \quad n_e = n_0 e^{\frac{e\phi}{kT}} \quad (1.2)$$

Reemplazando la ecuación (1.2) en (1.1) obtenemos:

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = 4\pi en_0 \left(1 - e^{\frac{e\phi}{kT}}\right) \quad (1.3)$$

Para $\frac{e\phi}{kT} \gg 1$ es posible expandir en series de Maclaurin. Aplicando esto a la ecuación (1.3) se obtiene:

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = \frac{-4\pi en_0 e\phi}{KT} \quad (1.4)$$

El punto límite de esta nube de partículas, es el punto en el cual la energía cinética de las partículas es comparable con el potencial eléctrico generado por el electrodo, en este punto el apantallamiento no es completo. Esta relación de energías define el radio máximo de las nubes de partículas, a esta distancia se le denomina longitud de Debye (λ_D).

$$\lambda_D = \left[\frac{KT_e}{4\pi n e^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.5)$$

La longitud de Debye es un criterio para definir si un gas ionizado es plasma, dado que para cumplir con el criterio de cuasi neutralidad, es necesario que λ_D sea mucho menor que las dimensiones de la región total de plasma.

Otro de los parámetros fundamentales del plasma, es la forma en la cual está distribuida la energía y esto puede deducirse haciendo la siguiente suposición:

“Un gas en equilibrio térmico la distribución más probable de velocidades está dada por una distribución Maxwelliana” (Ecuación 1.6)

$$f(u) = A e^{\frac{-mu^2}{KT}} \quad (1.6)$$

De esta información es posible derivar una expresión para la velocidad promedio $\langle V \rangle$.

$$\langle V \rangle = \frac{\int_0^{\infty} u f(u) du}{\int_0^{\infty} f(u) du} \quad \langle V \rangle = \sqrt{\frac{KT}{2m\pi}} \quad (1.7)$$

En nuestro caso esta velocidad se hace interesante justamente en λ_d y en el espacio contenido en una esfera de radio $r < \lambda_d$. Este espacio es justamente el que tomaremos para nuestro análisis.

1.2 Técnicas de Caracterización de Plasmas

Existen una serie de técnicas de caracterización de plasmas que buscan extraer información de los fenómenos involucrados en los reactores con el fin de optimizar los procesos. Entre ellas se destacan las técnicas de espectroscopia óptica y los métodos electrostáticos.

1.2.1 Espectroscopia Óptica

La espectroscopia óptica representa una serie de métodos para el estudio in situ de plasmas, básicamente consiste en registrar la luz proveniente del plasma, ya sea con o sin estimulación y a partir de esta luz colectada, obtener algunos datos sobre las especies presentes en el plasma (Rodrigo, 2004). En la Ilustración 2 se muestra un cuadro con algunas posibilidades de las técnicas espectroscópicas.

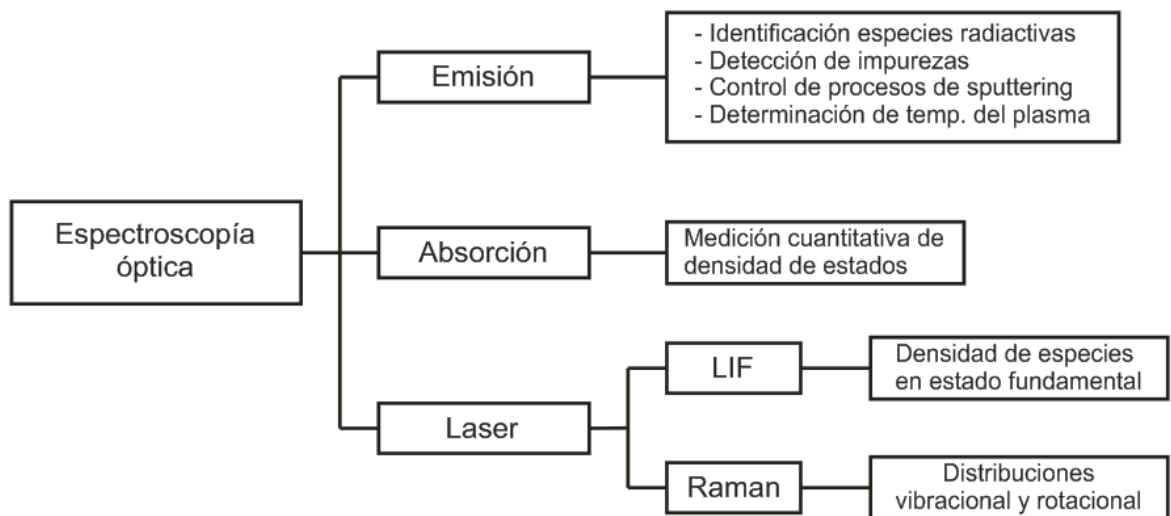


Ilustración 2: Clasificación de las posibles técnicas espectroscópicas (Rodrigo, 2004)

En los siguientes apartes presentaremos los principios de las técnicas de espectroscopia más utilizadas.

1.2.1.1 Espectroscopia Óptica de Emisión

Esta técnica se basa en la relación entre energía y longitud de onda $E_1 - E_2 = \frac{c}{\lambda}$. Esta relación predice que cada vez que una partícula realiza un salto de energía decreciente como una des-excitación, se emite un fotón cuya longitud de onda está directamente relacionada con la diferencia de energía ente los niveles (Rodrigo, 2004).

Esta técnica permite identificar de qué átomo, molécula o ion proviene el fotón así como cual es su estado energético cotejando los resultados obtenidos con datos suministrados en la literatura.

El equipo está formado por un sistema óptico para recoger luz y guiarla hasta la entrada del espectrómetro, el cual consiste en un monocromador que dispersa la luz según su longitud de onda sobre un arreglo de fotodiodos que registran un número de cuentas proporcionales al número de fotones incidentes.

Un espectro atómico (Ilustración 3) está compuesto por líneas que corresponden a la emisión de luz en una determinada transición electrónica de un estado a otro menos excitado. En el caso de un espectro molecular, las líneas están dadas por la adición de las energías de excitación electrónica E_e , vibracional E_v y rotacional E_r . Por lo tanto la energía total está dada por la suma de todas las energías de la molécula; este efecto hace que un espectro molecular sea un sistema de bandas.

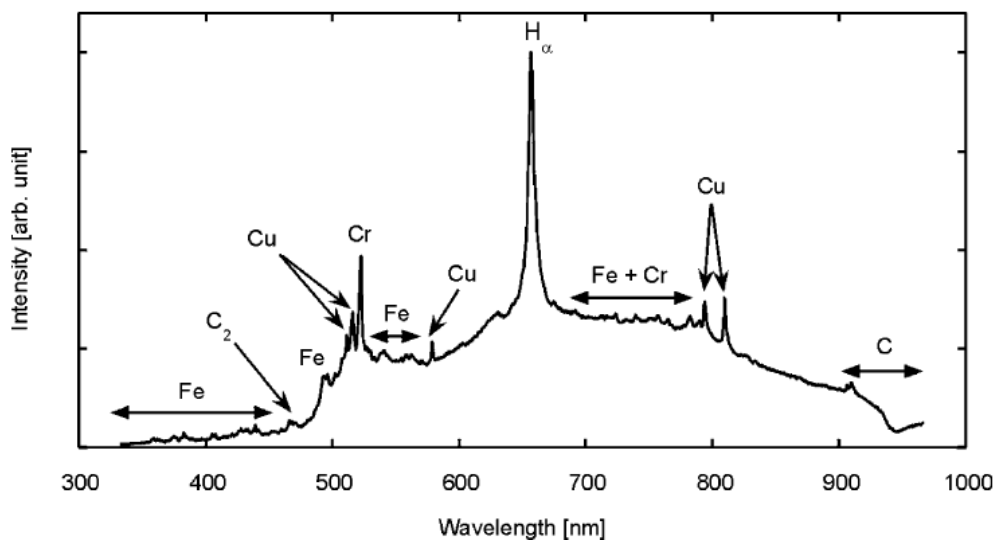


Ilustración 3: Espectro típico (Cu/steel, oil, 12 A, 2 s on-time) (Antoine Descoedres, 2004)

En procesos asistidos por plasma la espectroscopia óptica de emisión permite identificar claramente las especies presentes en el plasma, y de esta forma controlar los niveles de impurezas en procesos de “etching” y “sputtering”.

1.2.1.2. Espectroscopia Óptica de absorción

Esta técnica consiste en medir el coeficiente de absorción para algunas longitudes de onda. Esto se consigue haciendo atravesar la luz emitida por una fuente óptica de referencia a través del sistema a estudiar, y posteriormente la luz obtenida a la salida del sistema es analizada con un espectrómetro óptico. Esta medida puede obtenerse conociendo la intensidad emitida por la fuente (I_0) y la intensidad registrada a la salida del plasma (I_t) según la siguiente relación:

$$A_L = 1 - \frac{I_t}{I_0} \quad (1.8)$$

Un espectro de absorción es análogo a un espectro de emisión, es decir, en este caso obtendremos a la salida líneas o bandas de absorción específicas para cada átomo, molécula o ion presente en el plasma. La densidad relativa de los átomos absorbentes se deduce de la medida de A_L para cada una de las líneas de absorción (Rodrigo, 2004).

1.2.2. Sondas Electroestáticas

Una sonda electrostática (o sonda de Langmüir) funciona insertando uno o más electrodos polarizados con un potencial conocido dentro del gas ionizado, la corriente colectada por el electrodo(s) en este caso será la portadora de la información del sistema (Ilustración 4).

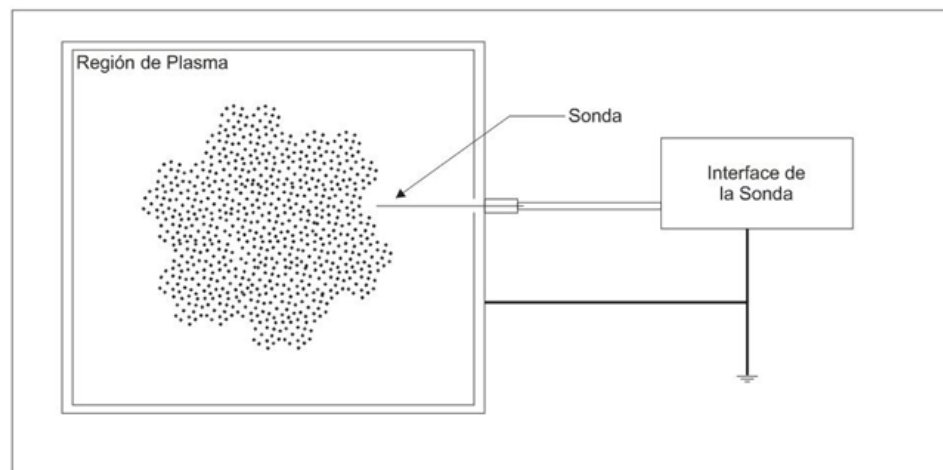


Ilustración 4: Esquema Sonda

Imaginemos cual es el fenómeno que ocurre específicamente sobre la superficie de la Sonda. Dado que la superficie de la sonda esta polarizada con un voltaje, este generara un movimiento de las partículas cargadas a su alrededor, atrayendo a la superficie partículas que sean de signo contrario al potencial de polarización. La corriente o intensidad eléctrica está definida como el flujo de carga por unidad de tiempo que recorre un material y esta se corresponde con un movimiento de los electrones en el interior del material.

Si Imaginamos un conductor inmerso en un mar de partículas (Ilustración 5) cargadas esta corriente pude definirse como:

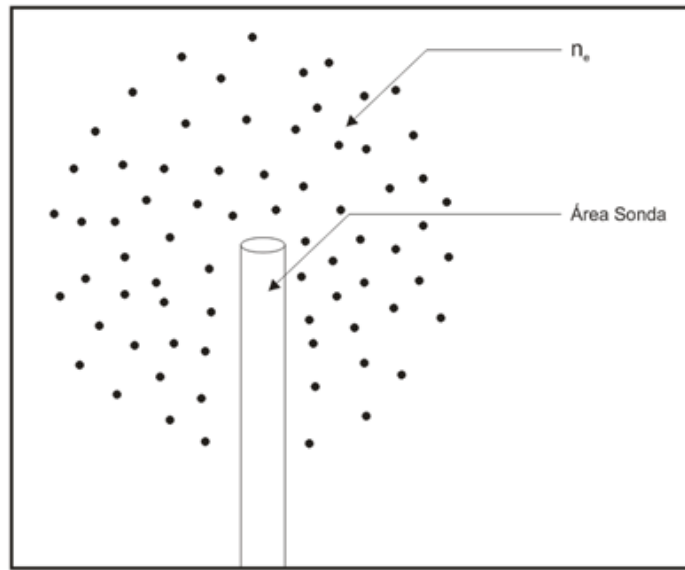


Ilustración 5: Sonda Inmersa en el plasma

$$I_s = A_s V \rho \quad (1.9)$$

Donde A_s corresponde al Área de la sonda, V a la velocidad de las cargas y ρ la densidad de partículas. En el caso del plasma y retomando la distribución de velocidades de la ecuación (1.7) esta expresión toma la forma de:

$$I_s = A_s e \sqrt{\frac{kT_e}{2m\pi}} n_0 e^{\frac{e\phi}{kT_e}} \quad (1.10)$$

Donde ϕ corresponde al potencial eléctrico que está definido por el Voltaje de plasma V_s y el Voltaje aplicado a la sonda V_p ambos voltajes dependen del número de electrodos y la forma en la cual estos estén distribuidos en la región

de plasma. De esta característica se desprenden las dos formas posibles de realizar la prueba.

1.2.2.1. Sonda Simple

En este caso la prueba consiste de un solo electrodo cuyo potencial tiene como referencia la tierra de todo el sistema (Ilustración 6). Para este caso el potencial está definido como:

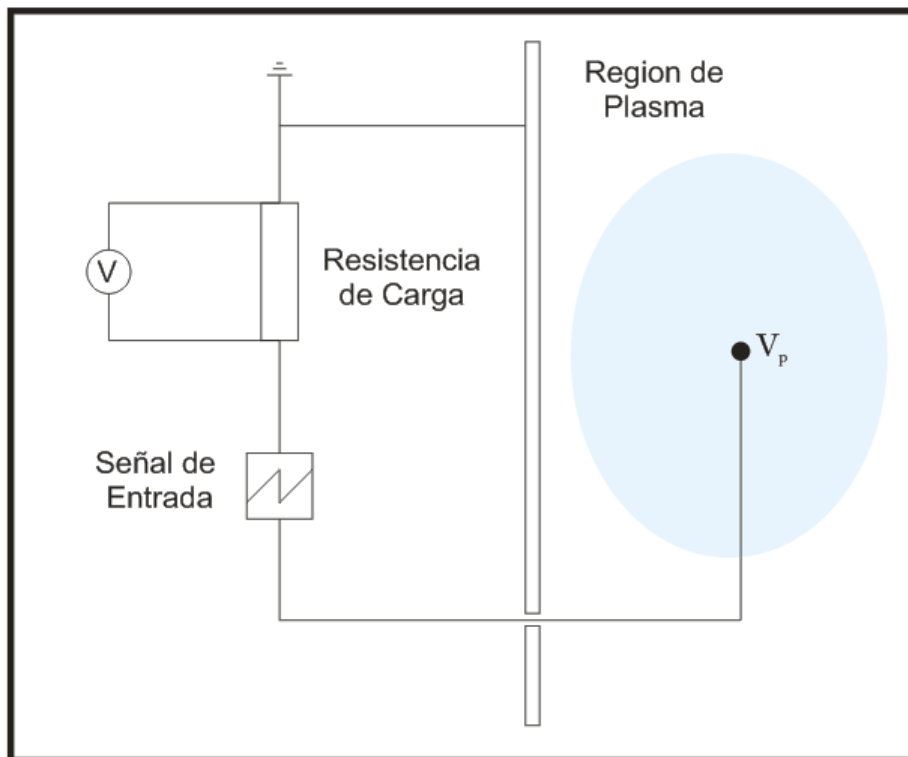


Ilustración 6: Sonda Simple

$$\phi = V = (V_s + V_p) \quad (1.11)$$

Para ilustrar lo que ocurre en esta situación es útil analizar la curva V vs I , (Ilustración 7)

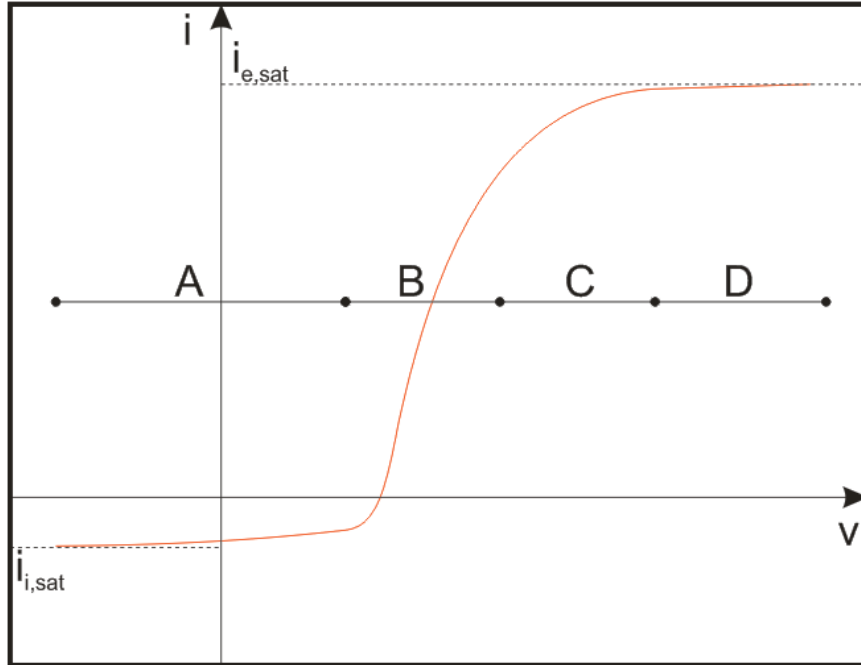


Ilustración 7: Curva esquemática I V sonda Simple

De esta curva es posible extraer cuatro regiones de interés:

- Región A: En esta región $V_p \ll 0 < V_s \rightarrow V \ll 0$ los electrones son repelidos del electrodo, mientras que los iones positivos son fuertemente atraídos hacia este, en esta región la corriente sobre el electrodo es debida principalmente a la corriente iónica.
- Región B: En esta región $V_p < 0 < V_s \rightarrow V < 0$ los iones positivos siguen siendo atraídos, mientras los electrones son repelidos con menor intensidad, por lo tanto aquellos electrones que poseen la energía suficiente para superar el potencia V_p consiguen llegar al electrodo. En esta región la corriente sobre el electrodo es debida tanto por corriente electrónica como por corriente iónica.
- Región C: En esta región $0 < V_p < V_s \rightarrow V > 0$ los iones positivos comienzan a ser repelidos, mientras que los electrones son atraídos. En esta región la corriente iónica desaparece y la corriente sobre el electrodo es debida principalmente a una corriente electrónica.
- Región D: En esta región $0 < V_s < V_p \rightarrow V > 0$ los iones positivos son repelidos del electrodo, mientras que los electrones son fuertemente atraídos hacia este, en esta región la corriente sobre el electrodo es debida principalmente a la corriente electrónica.

Suponiendo que el volumen del electrodo está contenido en una esfera de $r = \lambda_D$ es posible calcular de esta curva n_e y T_e de la Ecuación (1.10) la cual representa las regiones B y C de la curva. Graficando $\ln I_e$ vs $V_p = (V - V_s)$ y conservando nuestra suposición de distribución Maxwelliana la pendiente de esta curva es $\frac{e}{kT_e}$.

Conociendo T_e es posible obtener n_e de la región A de la curva.

$$I_{e,sat} = Aen_e(V) \quad (1.12)$$

Si bien las sondas simples constituyen una buena aproximación al modelo, estas presentan algunas dificultades técnicas cuando son usadas en la caracterización de plasmas generados en descargas sin electrodos como los son las generadas por RF, Microondas. Para solucionar este tipo de inconvenientes se han desarrollado algunas soluciones.

Una de estas soluciones consiste en el uso de electrodos de compensación, los cuales consisten en electrodos que son ubicados a una pequeña distancia del electrodo de medida, estos electrodos de compensación son conectados a la tierra del sistema, esto con el fin de servir como referencia y mejorar la respuesta del sistema ante la frecuencia de excitación de la descarga.

1.2.2.2. Sonda Doble

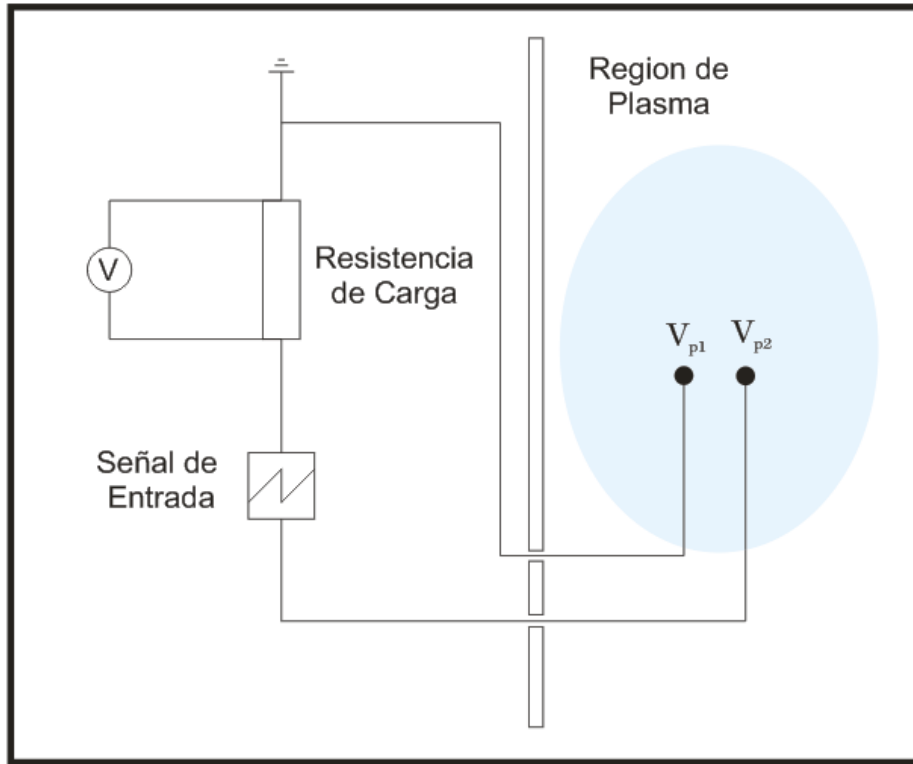


Ilustración 8: Sonda Doble

Las sondas dobles se emplean para evitar el uso de un electrodo de referencia. Un circuito típico de una sonda doble (Ilustración 8) consiste en un par de electrodos referenciados a una tierra diferente a la referencia de la descarga. La idea de este diagnóstico consiste en ubicar ambas sondas en lugares muy próximos, para garantizar que las características del plasma en las regiones próximas a los electrodos sean similares. Para este caso el potencial está definido como:

$$\phi = V = (V_{p1} - V_{p2}) \quad (1.13)$$

Cabe anotar que este potencial V siempre será tal que $V < V_s$, dadas estas condiciones tenemos dos posibles situaciones:

- $V_{p1} = V_{p2} \rightarrow V = V_f$: El potencial en las dos sondas es igual por lo tanto no circula ninguna corriente entre estas, se puede decir que ambas sondas adquieren un potencial V_f y se comportan como un material aislante.

- $V_{p1} < V_{p2}$: En este caso la sonda numero uno esta polarizada con un potencial V_{p1} menor respecto a la sonda a la sonda numero dos polarizada con un potencial V_{p2} . Para estas condiciones la corriente total I_t fluirá en dirección a la sonda numero 1 y su magnitud será la suma tanto de la corrientes iónica como la corriente electrónica.¹

$$I_t = i_{i1} - i_{e1} = -(i_{i2} - i_{e2}) \quad (1.14)$$

De la curva pueden identificarse tres regiones bien definidas (Ilustración 9):

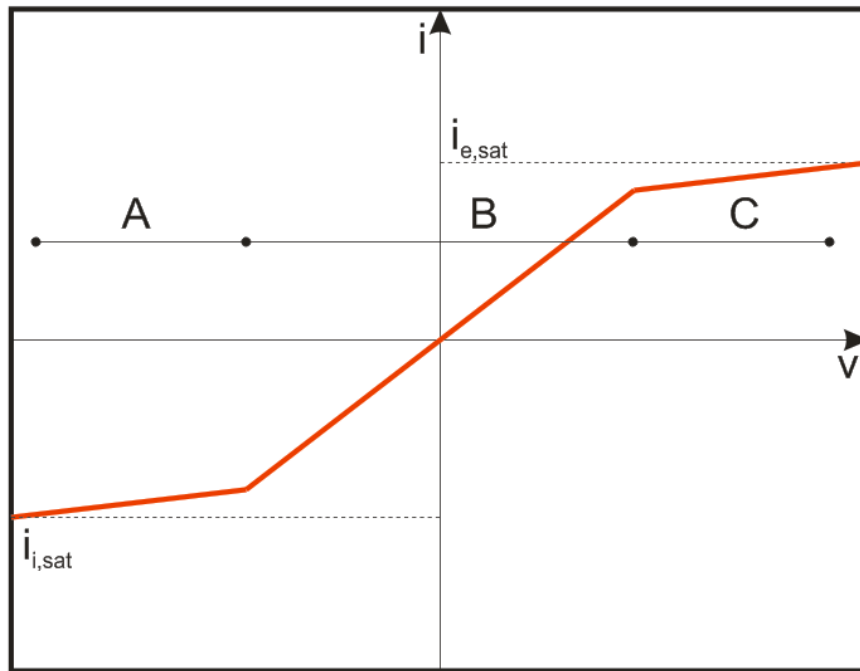


Ilustración 9: Curva esquemática I V sonda doble

- Región A: En esta región $V_{p1} < V_{p2} \rightarrow V \ll 0$ en este caso la corriente sobre la sonda número 1 es puramente iónica y la dependencia $I(V)$ es muy suave, debido a que se encuentra ne la region de saturacion ionica.
- Región B: En esta región $V \rightarrow 0$ a medida que V tiende a cero la corriente iónica es parcial mente compensada por la corriente

¹ La corriente sobre la sonda numero uno es simetría a la corriente sobre la sonda numero 2 solo que con dirección opuesta

electrónica haciendo que esta tienda a cero, en esta región la dependencia $I(V)$ es bastante fuerte.

- Región C: En esta región se reproduce lo ocurrido en la región A solo que con valor invertido.

Dado que V_{p1} y $V_{p2} < 0$ es posible aplicar la ecuación (1.10) para evaluar los valores de i_{e1} y i_{e2} usando la ecuación (1.12) obtenemos:

$$I_t = i_{i1}(V_{p1}) - i_{e,sat} e^{\frac{eV_{p1}}{KT_e}} = - \left(i_{i2}(V_{p2}) - i_{e,sat} e^{\frac{eV_{p2}}{KT_e}} \right) \quad (1.15)$$

Si derivamos la primera de las desigualdades de la ecuación (1.15) con respecto a V obtenemos:

$$\frac{dI_t}{dV} = \frac{di_{i1}(V_{p1})}{dV} - i_{e,sat} \frac{eV_{p1}}{KT_e} \frac{dV_{p1}}{dV} \quad (1.16)$$

Como la inversión en el sentido de la corriente significa simplemente cambiar de posición las sondas dentro de la medida debe cumplirse que $V_{p1}(V) = V_{p2}(-V)$. Derivando la ecuación (1.13) obtenemos:

$$1 = \frac{dV_{p1}}{dV} - \frac{dV_{p2}}{dV} \quad (1.17)$$

$$\frac{dV_{p1}}{dV} = - \frac{dV_{p2}}{dV} \quad (1.18)$$

$$\frac{1}{2} = \frac{dV_{p1}}{dV} \quad (1.19)$$

Finalmente reemplazando la ecuación (1.19) en la ecuación (1.16) obtenemos una expresión de la cual es posible evaluar la temperatura electrónica:

$$\frac{dI_t}{dV} = \frac{di_{i1}(V_{p1})}{dV} - \frac{i_{e,sat} \frac{eV_{p1}}{KT_e}}{2} \quad (1.20)$$

Ahora para obtener cada uno de los términos de la ecuación (1.20) seguiremos el siguiente procedimiento:

1. $\frac{dI_t}{dV}$ Este término puede extraerse de la pendiente de la grafica en $V = V_f$.
2. $\frac{di_{i1}(V_{p1})}{dV}$ Este término se obtiene extrapolando la Región A de la grafica hasta $I = 0$.

3. Podemos extraer T_e despejando la ecuación (1.20).
4. Finalmente y conociendo T_e podemos encontrar n_e de la región de saturación.

1.3. Estado del Arte

El uso de sondas electrostáticas para caracterización de gases ionizados fue usado por primera vez por el físico Irving Langmür en el año 1924 durante sus trabajos con emisión termoiónica. Él propuso un dispositivo que permitía extraer los parámetros de densidad y temperatura electrónica de las especies dentro de la cámara que se pretendía estudiar. Este dispositivo fue conocido posteriormente como sonda de Langmür y se constituyó como un método bastante útil para la caracterización de gases ionizados. Esta invención y este método de caracterización de plasmas fueron patentados solo hasta el año 1969 (Grey, 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 (Ilustración 10) y sobre estos elementos giran las discusiones presentadas por la literatura.

- Sonda
- Circuito de Polarización
- Recolección y procesamiento de datos

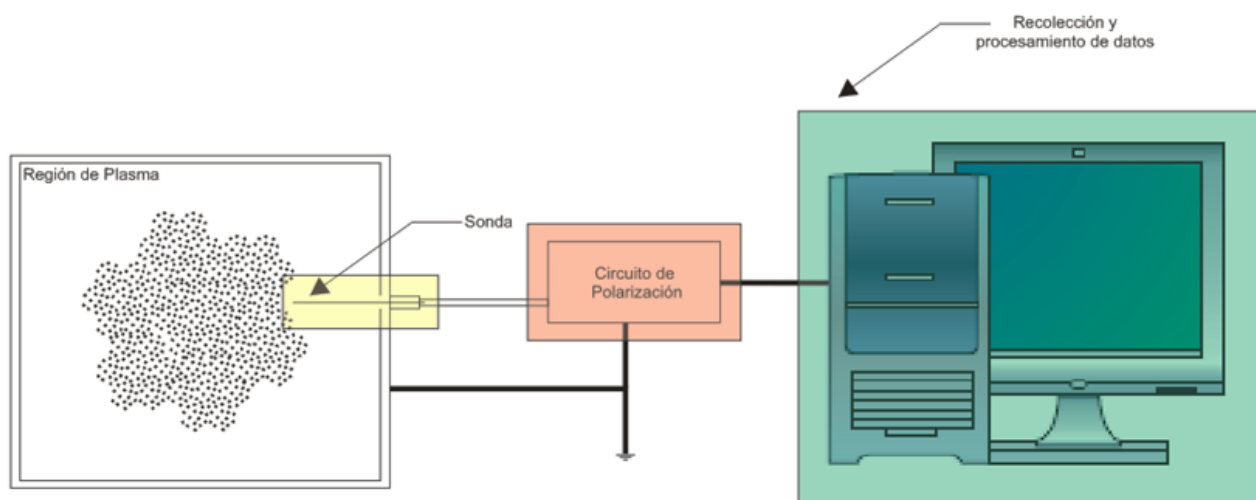


Ilustración 10: Esquema del sistema de medida

1.3.1. Sonda

La sonda es el elemento que se encuentra en contacto directo con el plasma y se encarga de coleccionar las cargas presentes en este. Esta acción requiere unas ciertas características tanto del material como de la geometría de la sonda.

Dado que la sonda se encuentra en contacto directo con el plasma esta tiene que ser capaz de coleccionar las cargas sin ser afectado por las condiciones de temperatura presentes en esta región. En la literatura se han reportado materiales conductores con un alto punto de fusión, sin embargo a la temperatura a la que es sometida la sonda depende particularmente del proceso que se desea realizar, materiales como Cobre (KIM, 1997) , Molibdeno (Kim, 2004) y Tungsteno (Rhijn, 2008) han sido usados para este propósito. Esto da un rango de puntos de fusión de entre 1357K para el cobre y 3683K para el tungsteno.

La parte de la sonda que está en contacto directo con el plasma está sometida a la aparición de una serie de fenómenos básicos asociados a la colisión de las partículas cargadas con la superficie de la sonda:

- En el primero caso (Ilustración 11) las partículas cargadas son reflejadas al chocar con el material y parte de su energía cinética es entregada al material en forma de calor. Esto ocurre cuando la energía cinética de las partículas cargadas es relativamente baja.
- El segundo caso (Ilustración 12) ocurre cuando la energía cinética de las partículas cargadas es suficiente para dislocar los átomos de la estructura cristalina del material y incrustarse en el material.
- En el último caso (Ilustración 13) la energía cinética de las partículas cargadas es suficientemente alta para dislocar la estructura cristalina del material arrancando átomos del mismo.

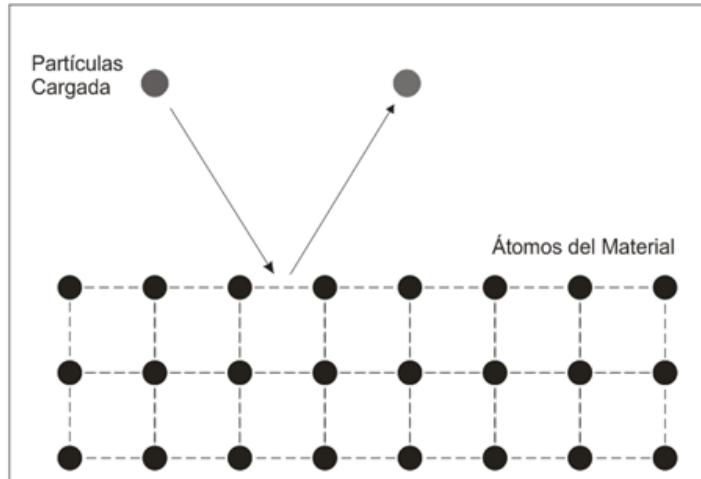


Ilustración 11: Reflexión de Iones

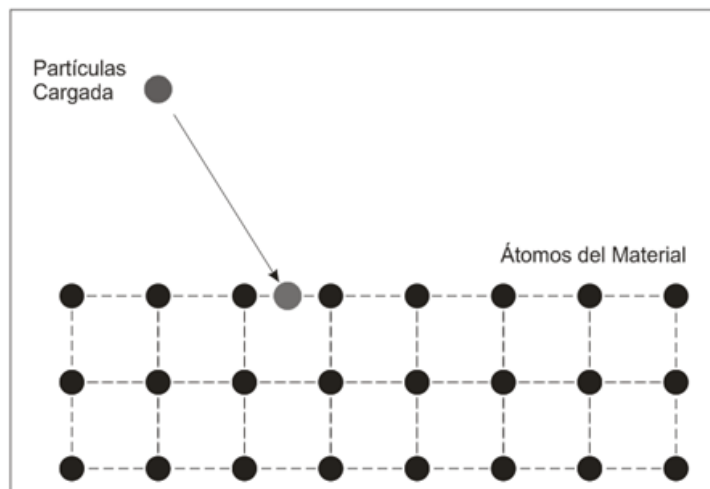


Ilustración 12: Implantación de los Iones

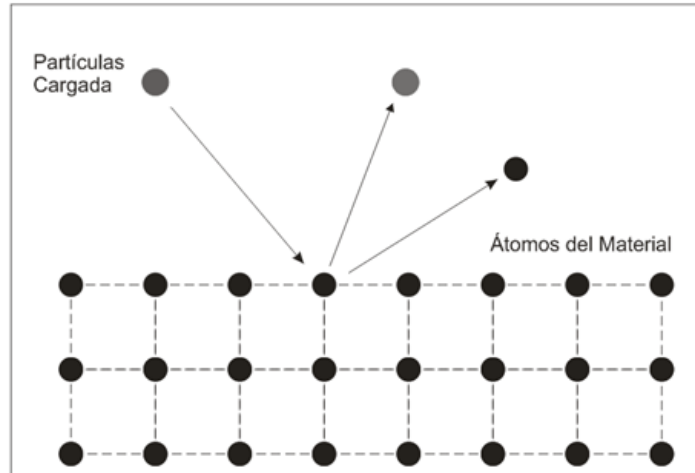


Ilustración 13: Sputtering

Estos efectos ponen en juego la energía de ligación de los átomos del material de la sonda y dan un parámetro de selección de materiales, para garantizar que el material seleccionado para la sonda no va a ser alterado en el proceso.

Con respecto a la geometría de la sonda, es importante que la región expuesta de la sonda posea una geometría conocida y fácilmente representable matemáticamente, ya que esta geometría es un factor importante al momento de interpretar los datos. La literatura reporta geometrías cilíndricas (Cirino, 1998) en todos los casos, sin embargo la teoría plantea la posibilidad del uso de otras geometrías simples (M.Mafra, 2005) (Ilustración 14).

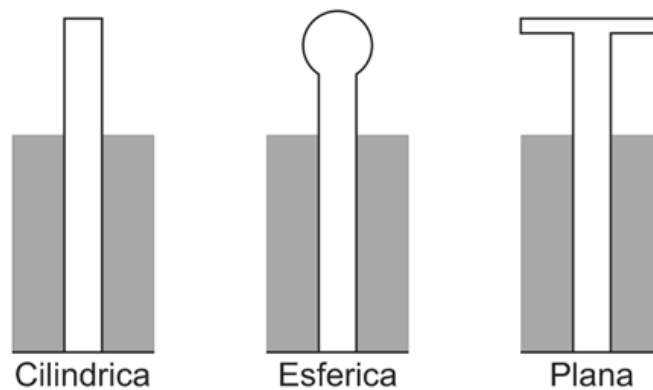


Ilustración 14: Geometría Sondas

Otro de los factores importantes es el aislamiento de las demás superficies de la sonda del efecto de las partículas cargadas. Para este propósito la literatura reporta el uso de encapsulados coaxiales (Cirino, 1998) en donde en el centro se encuentra la sonda, rodeada por una capa de vidrio y finalmente aislada de las ondas electromagnéticas por una capa más externa de material conductor (Ilustración 15). Este encapsulamiento del sistema disminuye las perturbaciones que este genera sobre el plasma y garantiza que la sonda no actúe como una antena.

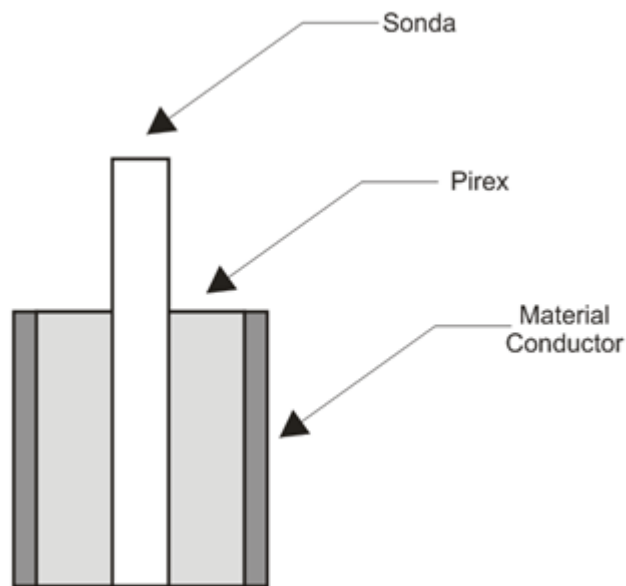


Ilustración 15: Aislamiento Sonda

La literatura reporta que en algunos casos se adicionan un circuitos de filtrados de señal directamente en el cuerpo de la sonda, esto con el fin de eliminar de la señal el ruido generado por la fuente de excitación usada para general el plasma. Normalmente debido a las altas frecuencias usadas los filtros implementados son filtros pasivos (Cirino, 1998) que se sintonizan para eliminar la frecuencia principal y algunos de sus armónicos.

1.3.2. Circuito de Polarización

La siguiente etapa del sistema consiste en el circuito encargado de hacer circular una corriente por la sonda, las implementaciones de estos circuitos son muy específicas en cada caso, los circuitos de polarización cambian con respecto a la disponibilidad de elementos para su construcción. Sin embargo

los requerimientos técnicos son un factor común en cada una de las implementaciones. El circuito usado para polarizar la sonda consta básicamente de (Ilustración 16): una etapa de generación de señal, una etapa de amplificación, una etapa donde la corriente circula por la sonda y una última etapa en donde finalmente la señal de corriente es censada.

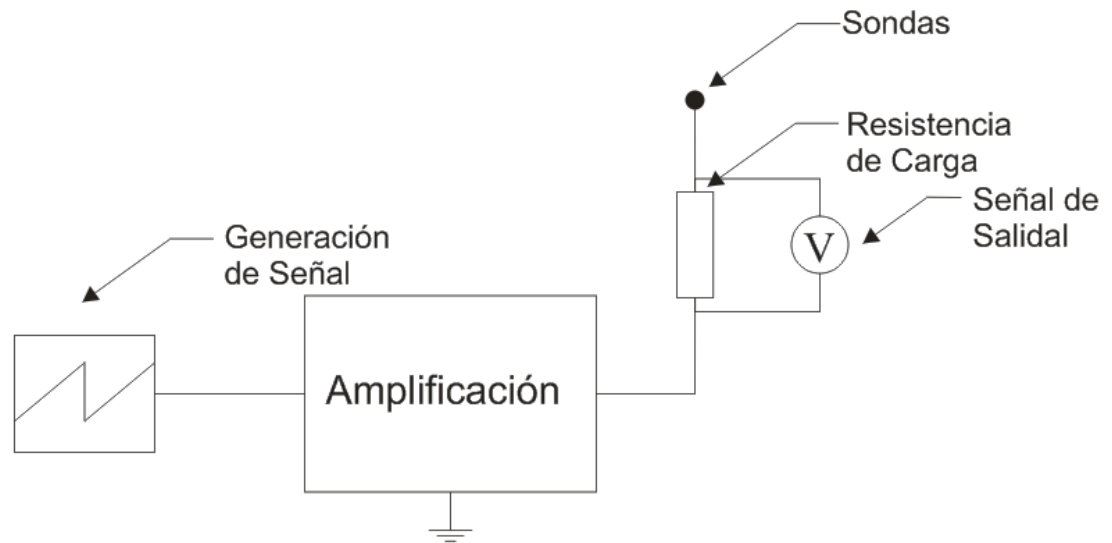


Ilustración 16: Esquema circuito de polarización

La literatura reporta que este circuito debe polarizar la sonda con voltajes que van desde -100V hasta 40V (Rhijn, 2008), normalmente se usan señales de entrada en forma de rampa para conseguir un amplio rango de barrido de voltajes, estos voltajes son obtenidos haciendo uso de amplificadores, en algunos casos la literatura reporta el uso de amplificadores de audio comunes (Rhijn, 2008), sin embargo, en implementaciones más sofisticadas se recomienda el uso de amplificadores de instrumentación para mejorar la relación señal ruido. Según la teoría con este rango de voltaje es posible acceder tanto a las regiones de saturación, como a la región de transición de la curva.

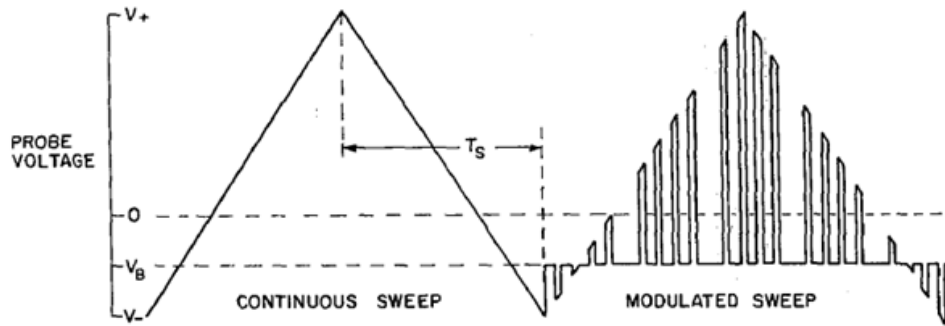


Ilustración 17: Modulated Sweep

En la literatura no se presentan demasiadas discusiones referentes a esta etapa, sin embargo en el año de 1977 (Ilustración 17) (Szuszczewicz, 1977), se propuso el uso de señales de prueba pulsadas, esta adición se planteo para evitar el proceso de recubrimiento sobre la superficie de la sonda en procesos prolongados. Este sistema pulsado es ideal cuando se pretende realizar un control en tiempo real sobre el sistema de plasma y la medida realizada sobre la sonda es usada como señal de realimentación para un sistema de control.

1.3.3. Recolección y procesamiento de datos

Esta última etapa se encarga de recolectar la información y llevarla a un sistema que permita su colección y posterior análisis. Este elemento también varía en cada una de las implementaciones, en las primeras implementaciones se hizo uso de graficadores *X vs Y* (Grey, 1969) y posteriormente se hacia el análisis manual de los datos. Actualmente es posible hacer uso de sofisticados sistemas de adquisición de datos que permiten capturar directamente la señal y realizan la conversión a formato digital para su posterior análisis en un computador. En la literatura se reporta el uso de osciloscopios digitales, tarjetas de adquisición de datos operadas por puerto GPIB (Rhijn, 2008) y sistemas de adquisición de datos usando puertos propios del computador como la tarjeta de sonido (AZOOZ, 2006).

En todos los casos y como medida de protección se hace uso de sistemas de aislamiento ya sean, ópticos o magnéticos para mantener aislado el sistema de polarización con respecto al sistema de medida, para esta tarea se reporta el

uso el de amplificadores de aislamiento como la serie AD202 (Rhijn, 2008) de la Compañía Analog Devices.

Los datos recolectados son posteriormente llevados a algún software que permita la construcción de las curvas I vs V a partir de dos señales ingresadas al sistema, en la literatura se reporta el uso de LabView (D. Homfray, 2007) y Matlab (AZOOZ, 2006) como los software más usados para este fin, esto porque estos permiten la adquisición y procesado de datos en tiempo real.

Una implementación interesante es la realizada en la Universidad de Mosul, Iraq (Ilustración 18) (AZOOZ, 2006) en donde la información es ingresada al sistema por medio del uso de la tarjeta de sonido, este sistema permite la digitalización de los datos de manera mucho más versátil y económica.

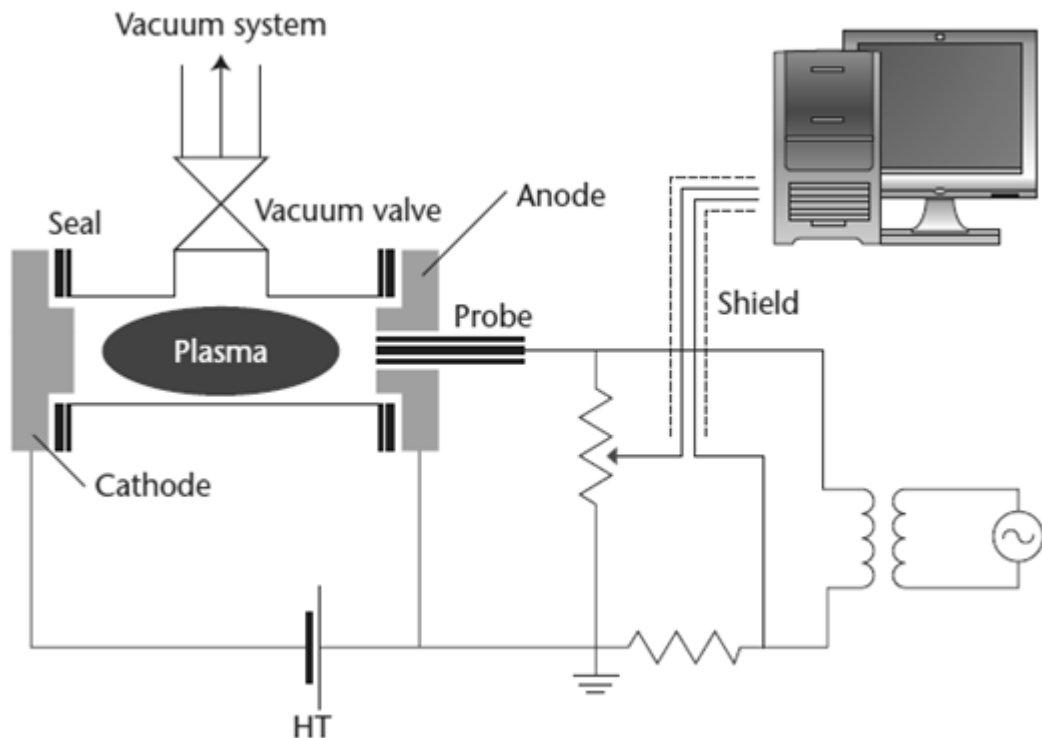


Ilustración 18: Montaje Experimental Universidad Mosul

Para esta técnica se hace uso del Toolbox de adquisición de datos de Matlab, un circuito de aislamiento magnético y otro de acondicionamiento de señal que entrega una salida en un rango entre $\pm 1V$.

El análisis de las curvas tradicionalmente se ha realizado haciendo uso de la ecuación (1.10). Sin embargo actualmente se plantea la extracción de una Función de distribución de energía directamente de los datos colectados (S. Dietrich, 2007) (D. Homfray, 2007). Esta técnica llamada Boyd-Twiddy es usada con éxito por algunos autores, quienes proponen otro tipo de funciones de distribución. Esta técnica está en la frontera del estudio y aun se encuentra en diversos foros de discusión.

Capítulo 2

Materiales y Métodos

Introducción

En este capítulo se intentara ilustrar paso a paso la metodología usada para la implementación del sistema de caracterización, desde su etapa de diseño, hasta su puesta en funcionamiento.

Para el diseño del dispositivo se hizo uso de 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 en el estado del arte. Posteriormente con una propuesta de diseño solida se procedió a la implementación y puesta a punta del dispositivo. A continuación se explicara detalladamente cada una de estas etapas.

2.1. Método de Diseño

2.1.1. *Diseño Conceptual*

El diseño conceptual es una herramienta de ingeniería que permite abordar el desarrollo de dispositivos desde sus funciones más básicas (Ilustración 19) y como estas están relacionados entre sí. Luego de entender estas relaciones básicas buscar alternativas de solución que cumplan con el deseo final del dispositivo (Rodríguez, 2003).



Ilustración 19: Modelo de Caja Negra

De la revisión del estado del arte, se definen los requerimientos técnicos, para finalmente generar una propuesta de diseño en base a la información disponible.

2.1.2. Especificaciones de Diseño de Producto

El punto de partida para el diseño un sistema de caracterización por sonda doble de Langmüir , consiste en acotar los requerimientos técnicos y de usuario del dispositivo en relación al contexto en el cual este va a ser usado. Para este fin se construirá un PDS (Product design specification) (Tabla 1) para definir lo que se necesita y lo que se desea del instrumento que se pretende diseñar.

2.1.3. PDS

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

Tabla 1: PDS - Product design specification

2.1.4. Requerimientos Técnicos

Para establecer los requerimientos técnicos de un sistema de sonda electrostática hemos dividido estos en tres grupos: Requerimientos desde el material, requerimientos desde la potencia y requerimientos desde el procesamiento de la señal.

2.1.4.1 Requerimientos desde los Materiales

Imaginando la Sonda desde su función y como un objeto inmerso directamente en la región de plasma este tiene que ser capaz de soportar estas

condiciones de plasma y a su vez conducir las cargas. A pesar de que puede asociarse la energía del plasma con altas temperaturas, la densidad de partículas dentro de este es suficientemente baja para que dicha energía térmica sea transmitida al material de forma directa. Los requerimientos del material dependen de su capacidad de soportar altas temperaturas sin cambiar de estado y de su capacidad de conducir las cargas, estos requerimientos son presentados en la tabla 2.

| Requerimiento | Max | Min | Unidades |
|------------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|
| Resistividad Eléctrica | 5×10^{-7} | 5×10^{-9} | $\frac{\Omega mm^2}{m}$ |
| Temperatura de Fusión | --- | 1300 | K |

Tabla 2: Requerimientos de los materiales

2.1.4.2. Requerimientos desde La Potencia

La sonda es un sistema que requiere una polarización determinada para garantizar su correcto funcionamiento. Esta polarización se realiza con una fuente externa que necesita entregarle al sistema un amplio barrido de voltajes, la literatura reporta rangos de entre $\pm 100V$ y $\pm 16V$. Estos requerimientos son presentados en la tabla 3.

| Requerimiento | Max | Min | Unidades |
|-------------------------|-----------|----------|----------|
| Voltaje de Alimentación | ± 100 | ± 16 | V |
| Corriente Disponible | --- | 900 | mA |
| Ruido de las Fuentes | 16 | --- | mV |

Tabla 3: Requerimientos Circuito de Polarización

2.1.4.3. Requerimientos desde La Señal

La información a la salida del sistema corresponde a una curva de corriente vs voltaje, en donde el voltaje hace referencia al voltaje de polarización de la sonda y la corriente corresponde a la corriente colectada por esta. La señal de prueba aplicada sobre la sonda requiere de una señal rampa que permita un barrido desde un potencial negativo respecto al potencial flotante hasta un potencial positivo. Esta señal debe poseer una alta relación señal ruido. Con respecto a la corriente colectada, Se requiere un acondicionamiento adecuado que permita que esta sea capturada por un sistema de adquisición de datos. Estos requerimientos son presentados en la tabla 4.

| Requerimiento | Max | Min | Unidades |
|------------------------|------------|------------|-----------------|
| Amplitud Señal Rampa | ± 10 | ± 0.1 | <i>V</i> |
| Frecuencia Señal Rampa | 10 | 100 | <i>Hz</i> |
| Relación Señal Ruido | 0,04 | --- | --- |

Tabla 4: Requerimientos Adquisición de Señal

2.1.5. Estructura Funcional

Analizando más de cerca los flujos del sistema y apegándonos a los requerimientos de diseño, es posible plantear una alternativa de estructura funcional (Ilustración 20), que cumple con los requerimientos de diseño especificado.

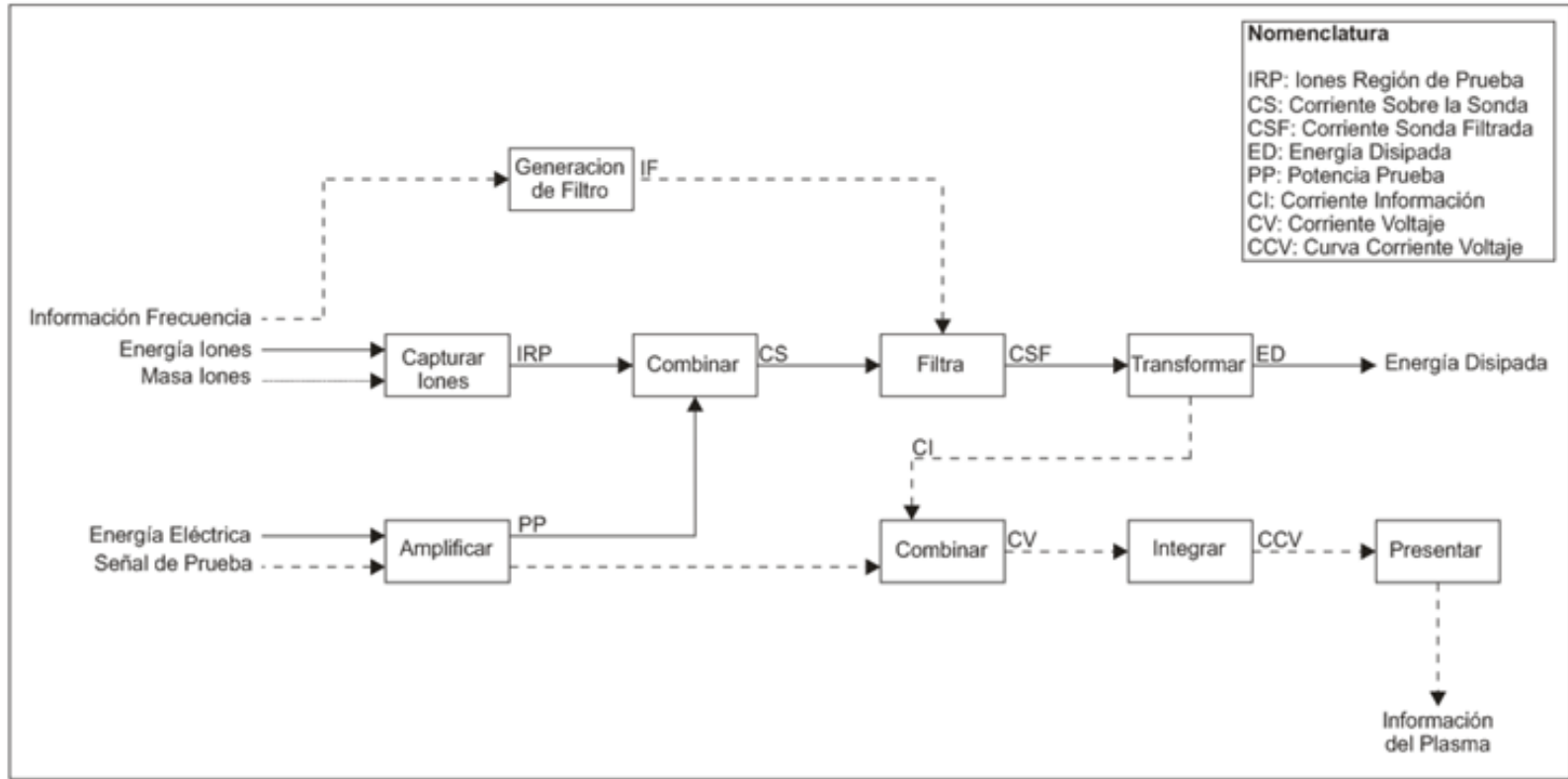


Ilustración 20: Estructura funcional

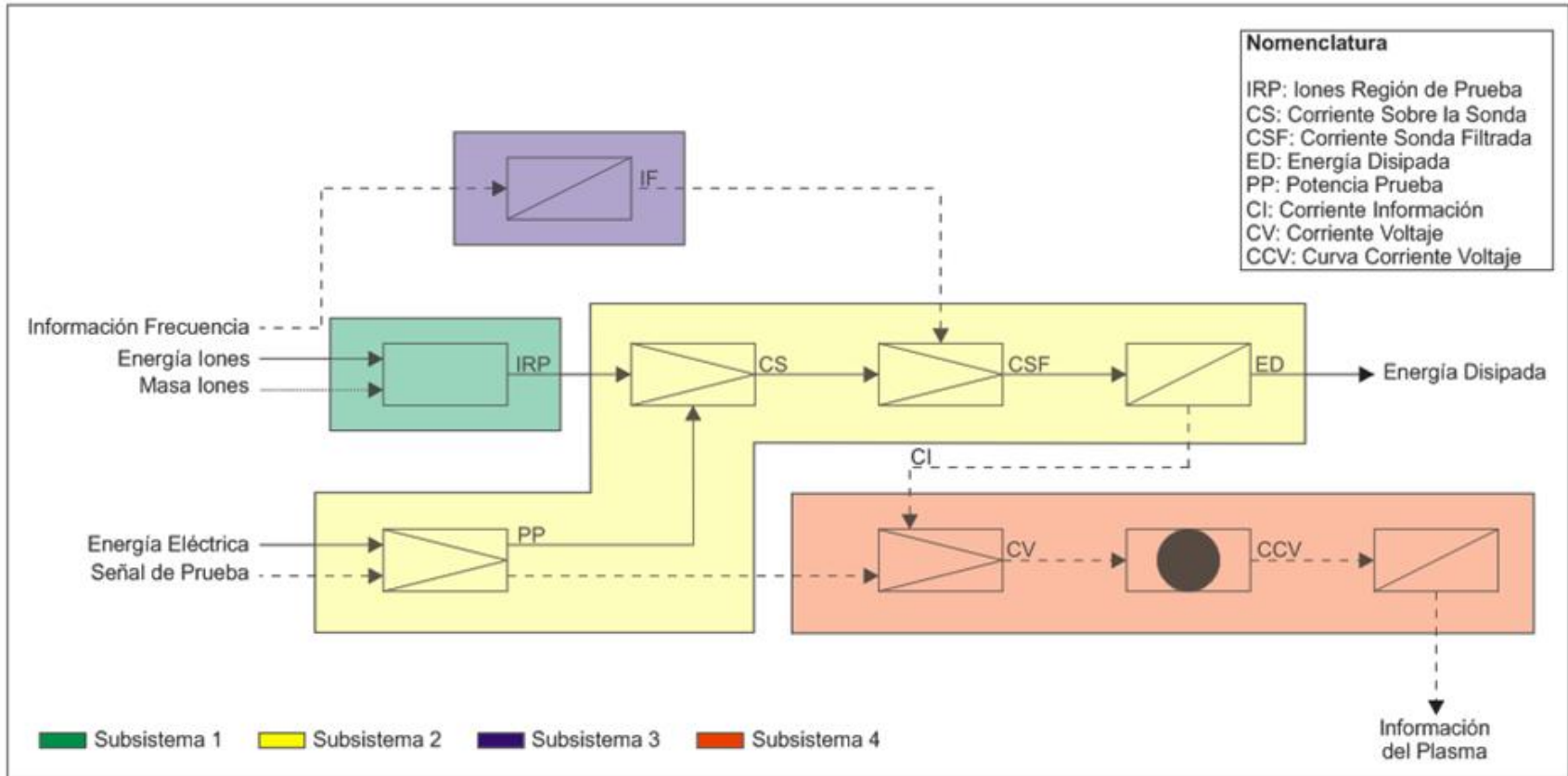


Ilustración 21: División en Subsistemas o Portadores de función

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 (Ilustración 21). Estos subsistemas pueden analizarse por separado para entender de manera más clara tanto los flujos principales como algunos flujos de menor relevancia y definir de este modo los portadores de función adecuados.

2.1.5.1. Subsistema 1

Es la parte inicial del proceso de medida, es la pieza que está en contacto directo con el plasma. Esta pieza tiene como función conducir las partículas cargadas colectadas del plasma, depende directamente de la geométrica como del material de la sonda. Analizando de manera más próxima los flujos del subsistema podemos identificar de manera más detallada los flujos que atraviesan este subsistema (Ilustración 22).

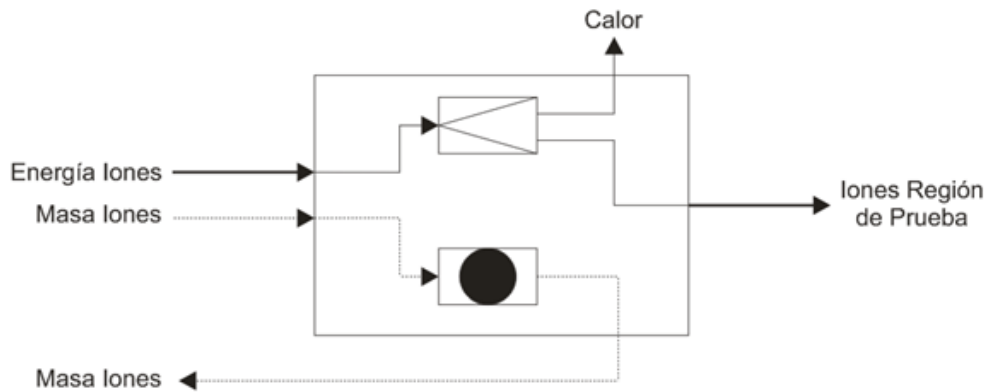


Ilustración 22: Subsistema 1

Al sistema ingresan los iones o partículas cargadas provenientes del plasma, estas tienen asociada tanto una masa como una energía. Este ingreso de iones sobre el material genera una perturbación en los electrones libres del material, generando de esta forma una corriente eléctrica que en este caso, es el flujo de interés, sin embargo, debido al bombardeo de las partículas cargadas, pueden aparecer tanto procesos de “sputtering” del material de la sonda como procesos de recubrimiento sobre la misma.

2.1.5.2. Subsistema 2

En este subsistema (Ilustración 23) se transforma la información conocida del plasma en información útil para el filtrado y acondicionamiento de la señal extraída de este. Este portador de función cobra relevancia para plasmas generados por presencia de ondas electromagnéticas, como son los casos de plasmas generados por RF y microondas. En ambos casos las frecuencias de operación son estandarizadas internacionalmente para evitar interferencias con otro tipo de sistemas.

Dado que la sonda es básicamente un conductor, este funciona como una antena sobre la cual se induce una corriente eléctrica debida a la presencia de estas ondas electromagnéticas. En este caso se hace necesario realizar un filtrado de las corrientes inducidas, ya que se constituyen como una señal poco relevante para el fin último del instrumentó.

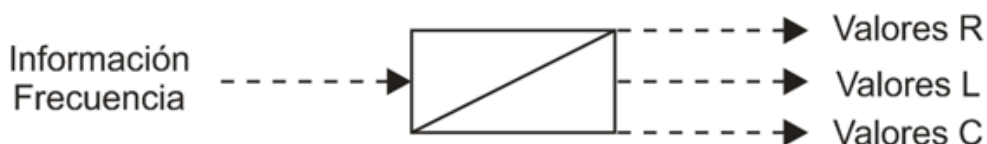


Ilustración 23: Subsistema 2

Para realizar el filtrado de esta señal existen teorías ya definidas, en este caso es necesario conocer la frecuencia exacta que se desea eliminar y tantos armónicos como sea pertinente, conociendo estos datos es sencilla la implementación de filtros elimina banda.

2.1.5.3. Subsistema 3

Consiste en el circuito eléctrico encargado de polarizar la sonda y de coleccionar la corriente. El sistema (Ilustración 24) posee una gran cantidad de flujos secundarios que requieren un análisis más detallado

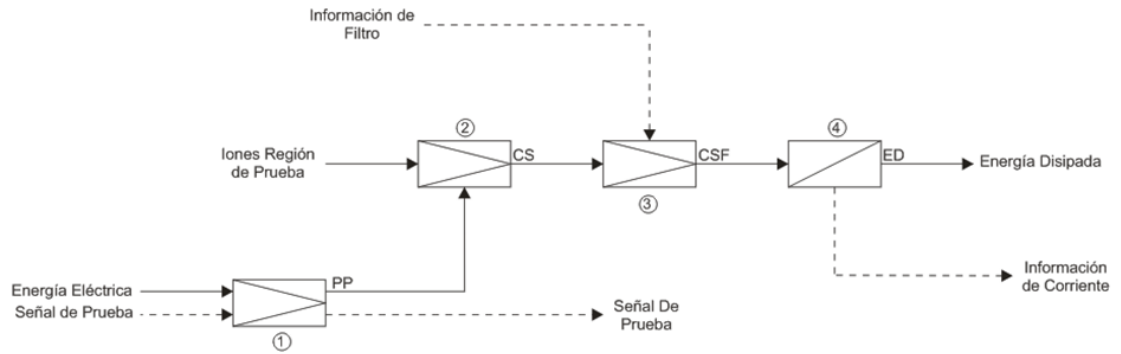


Ilustración 24: Subsistema 3

En la primera de estas etapas se unen la energía eléctrica proveniente de la red con la señal entregada al sistema para la polarización de la sonda. Analizando más detalladamente esta etapa del sistema podemos identificar varias funciones, una primera que consta en transformar la corriente eléctrica suministrada por la red domestica en una corriente DC, adecuada para alimentar un sistema de amplificación.

La siguiente de las estructuras funcionales dentro de este subsistema consiste en una etapa de amplificación (Ilustración 25), la cual debe ser alimentada tanto por la potencia previamente acondicionada como por la señal de prueba.

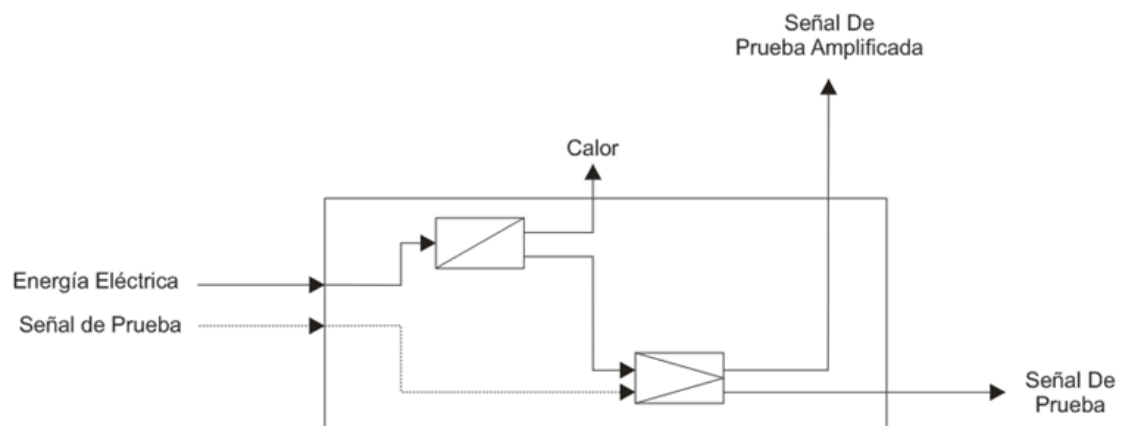


Ilustración 25: Subsistema 3.1

Comercialmente existen muchas referencias de amplificadores ya sean de instrumentación o simplemente amplificadores de audio convencionales. La

selección de estos depende tanto de la potencia como de los márgenes de error admisibles para el instrumento. De esta etapa del sistema obtenemos como salida la señal de prueba amplificada y lista para aplicar sobre la sonda.

En la segunda de las etapas del subsistema la señal amplificada es aplicada sobre la sonda generando una relación de dos vías, en donde la sonda es perturbada por el potencial aplicado y a su vez colecta la corriente. De esta etapa obtenemos como salida la corriente colectada por la sonda.

La siguiente de las etapas consiste en filtrar la corriente colectada para eliminar información innecesaria (Ilustración 26).

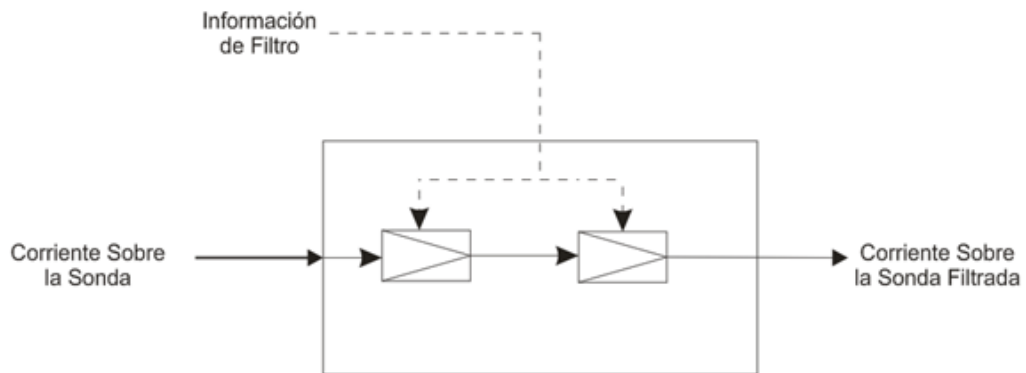


Ilustración 26: Subsistema 3.2

La implementación de este filtro puede realizarse ya sea con filtros activos o filtros pasivos. Al final de esta etapa debería obtenerse una corriente que posee adjunta la información relevante del plasma.

La última de las etapas de este subsistema (Ilustración 27) consiste en transformar la información de corriente en una información de voltaje que pueda ser ingresada en un sistema de adquisición de datos. La literatura reporta que esta función fue desarrollada usando resistores de precisión, sobre los cuales conociendo la caída de potencia es posible conocer la corriente que circula por estos.

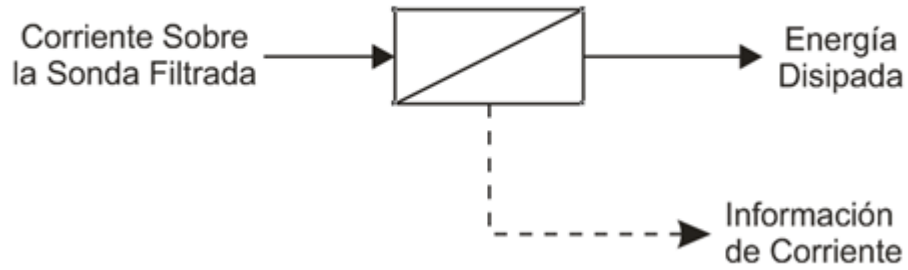


Ilustración 27: Subsistema 3.3

2.1.5.4. Subsistema 4

En esta etapa del sistema se recopila y ordenan los datos obtenidos durante las etapas anteriores (Ilustración 28), en este proceso es necesario ingresar la información colectada, a algún sistema de procesamiento de datos.

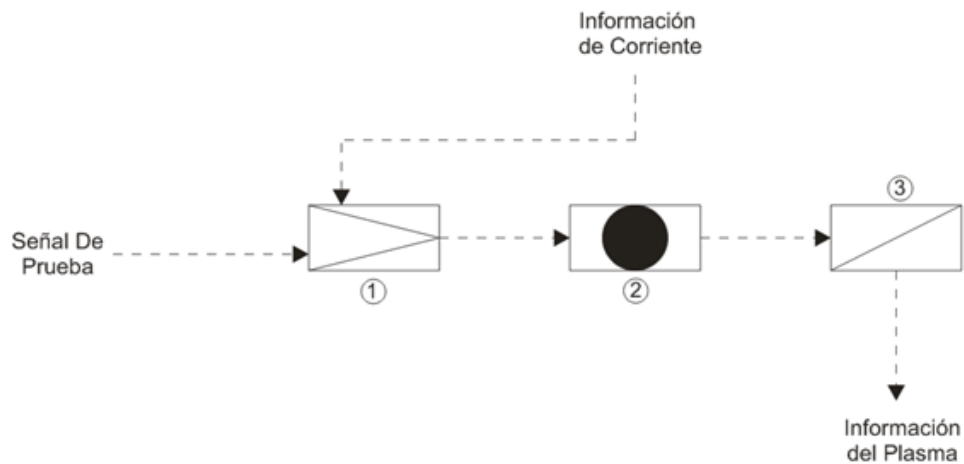


Ilustración 28: Subsistema 4

La primera de las etapas de este subsistema (Ilustración 29) consiste en la captura y mezclado de las señales, tanto la señal de polarización de la sonda como la señal obtenida.

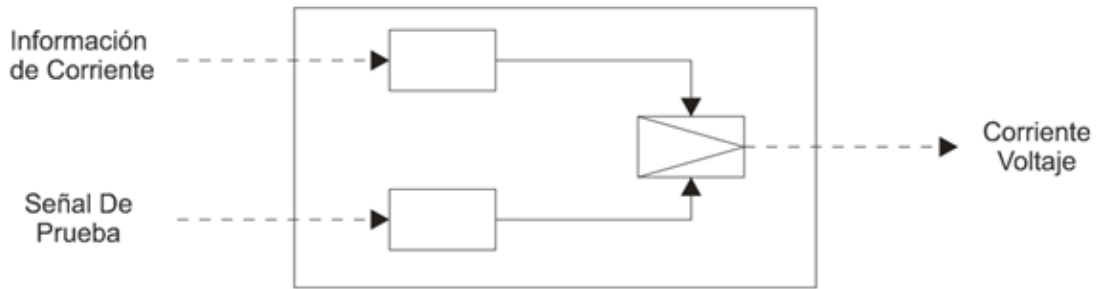


Ilustración 29: Subsistema 4.1

La implementación de este sistema de adquisición de datos puede ser realizada utilizando ya sea directamente los puertos de entrada del computador o sistemas externos de conversión analógicos digitales. Luego de digitalizar estos datos ya sea en un archivo de datos o una posición en una memoria, es posible ubicarlos en un único canal. Comercialmente es posible adquirir sistemas de adquisición de datos, estos ofrecen soluciones para una amplia gama de problemas, comúnmente estos dispositivos cuentan con una serie de canales analógicos que permiten el ingreso de datos. Este tipo de dispositivos también pueden ser implementados haciendo uso de microcontroladores y lógica discreta. La ventaja del uso de este tipo de dispositivos consiste en la facilidad con que la información puede ser interpretada.

2.1.6. Matriz Morfológica

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 5 se presenta el resumen de los portadores de los posibles portadores función.

| Subsistema | Portador | | | |
|---------------------------------|-------------------------|---------------|-----------------------------------|-----------------------|
| Colección de Cargas | Cilíndrica | Rectangular | | Plana |
| | Tungsteno | Cobre | | Molibdeno |
| 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 5: Matriz Morfológica

2.1.7 Alternativas de Solución

| Subsistema | Portador | | | |
|---------------------------------|-------------------------|---------------|-----------------------------------|-----------------------|
| Colección de Cargas | Cilíndrica | Rectangular | | Plana |
| | Tungsteno | Cobre | | Molibdeno |
| 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 6: Alternativa de solución 1

| Subsistema | Portador | | | |
|---------------------------------|-------------------------|---------------|-----------------------------------|-----------------------|
| Colección de Cargas | Cilíndrica | Rectangular | | Plana |
| | Tungsteno | Cobre | | Molibdeno |
| 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 7: Alternativas de solución 2

| Subsistema | Portador | | | |
|---------------------------------|-------------------------|---------------|-----------------------------------|-----------------------|
| Colección de Cargas | Cilindrica | Rectangular | | Planar |
| | Tungsteno | Cobre | | Molibdeno |
| Filtrado de Señal | Filtro Activo | Filtro Pasivo | | Filtrado por Software |
| Circuito de Polarizacion | Amplificadores de Audio | | Amplificadores de Instrumentacion | |
| Adquisicion de Datos | Microcontrolador | Sound Card | Tarjeta de Adquisicion de datos | Osciloscopio digital |

Tabla 8: Alternativa de solución 3

| Subsistema | Portador | | | |
|---------------------------------|-------------------------|---------------|-----------------------------------|-----------------------|
| Colección de Cargas | Cilindrica | Rectangular | | Planar |
| | Tungsteno | Cobre | | Molibdeno |
| Filtrado de Señal | Filtro Activo | Filtro Pasivo | | Filtrado por Software |
| Circuito de Polarizacion | Amplificadores de Audio | | Amplificadores de Instrumentacion | |
| Adquisicion de Datos | Microcontrolador | Sound Card | Tarjeta de Adquisicion de datos | Osciloscopio digital |

Tabla 9: Alternativa de solución 4

2.1.8 Parámetros de selección

| Parámetro | Significancia | Elemento | | | |
|-----------------------|---------------|-----------------------------|---------------|-----------------------------------|----------------------|
| | | Material | | | |
| | | Tungsteno | Cobre | Molibdeno | |
| 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 | |
| Presicion | 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 |

Tabla 10: Parámetros de Selección

| Parámetro | Significancia | Solución 1 | Solución 2 | Solución 3 | Solución 4 |
|------------------------------|---------------|------------|------------|------------|------------|
| Conductividad | 5% | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Temperatura de Fusión | 5% | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Implementación - Geometría | 10% | 5 | 5 | 5 | 2 |
| Implementación - Filtro | 10% | 4 | 5 | 5 | 4 |
| Costo - Amplificador | 20% | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Precisión | 10% | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Ancho de Banda | 5% | 3 | 4 | 2 | 5 |
| Implementación | 5% | 1 | 5 | 3 | 5 |
| Costo - Adquisición de datos | 20% | 5 | 2 | 5 | 1 |
| Resolución | 10% | 2 | 4 | 2 | 5 |
| Total | | 4 | 3,95 | 4,15 | 3,5 |

Tabla 11: Evaluación alternativa de solución

2.2 Materiales

En esta sección presentaremos los materiales usados para la implementación del dispositivo.

2.2.1. Sonda

La sonda que se implemento (Ilustración 30) consiste en un par de cilindros de cobre de $0.61mm$ de diámetro, encapsulados individualmente en capilares de vidrio. Los capilares fueron introducidos en un tubo vidrio de diámetro mayor. Para garantizar el aislamiento electromagnético fue usada una lámina de aluminio ubicada en la cara interna del tubo de vidrio.



Ilustración 30: Sonda Implementada

2.2.2. Circuito de Polarización

La implementación del circuito de polarización se realizó usando el amplificador *LM3886* en su configuración típica (Anexo - Datasheet *LM3886*), 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 el censado de corriente se empleó una resistencia de carga de 560Ω conectada entre una de las sondas y la tierra del circuito de polarización.

Para garantizar el aislamiento eléctrico del sistema fueron usados dos amplificadores de aislamiento *AD202* configurados en modo de ganancia

unitaria (Anexo - Datasheet AD202), ubicados entre la señal de entrada y la salida de la resistencia de carga.

2.2.3. 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. (Anexo – Circuito de Offset)

La programación de los microcontroladores se realizó de modo que tras obtener los datos del conversor analógico digital, estos fueran inmediatamente organizados en formato CVS (Comma Separated Values) y enviados por puerto serial. Esta programación fue implementada en C y se optimizó para minimizar el tiempo de respuesta de los conversores analógico digital. (Anexo – Programa Microcontrolador)

Para garantizar una buena frecuencia de muestreo y la adquisición simultánea de los datos, se emplearon dos microcontroladores sincronizados entre sí por la misma señal de disparo y la misma señal de reloj. (Anexo – Circuito adquisición de datos)

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. Sin embargo, esta implementación puede ser remplazada haciendo uso del programa Hyperterminal y recibir los datos de forma independiente por cada uno de los puertos. (Anexo – Interface LabView)

Para la interpretación y tratamiento de los datos se usó el software Excel. (Anexo – Instrucciones de tratamiento)

2.2.4. Sistema Caracterizado

El equipo empleado para comprobar el funcionamiento del sistema de caracterización, consiste en un reactor de proceso basado en un horno microondas convencional (Ilustración 31), 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 número *No. 10 – 027016* , que actualmente se esta en trámite.

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.



Ilustración 31: Sistema Caracterizado

2.3. 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.

2.3.1 Diseño Factorial Completo 2^k

Este método describe los experimentos más adecuados para conocer simultáneamente qué efecto tienen k factores sobre una respuesta y descubrir si interactúan entre ellos. Estos experimentos están planeados de forma que

se varían simultáneamente varios factores pero se evita que se cambien siempre en la misma dirección. Además, los experimentos se complementan de tal modo que la información buscada se obtiene combinando las respuestas de todos ellos. Esto permite obtener la información con el mínimo número de experimentos y con la menor incertidumbre posible.

2.3.2. Medidas Realizadas

En nuestro caso 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 para cada uno de los factores involucrados:

$$H_0: A = 0$$

$$H_A: A \neq 0$$

Para cada uno de los tratamientos se realizaron 4 replicas aleatorias implicando finalmente 16 corridas del sistema para obtener la información necesaria.

| Corrida | Tratamiento | Replica |
|---------|---------------|---------|
| 1 | $a^1b^0 = a$ | 1 |
| 2 | $a^0b^1 = b$ | 1 |
| 3 | $a^1b^1 = ab$ | 1 |
| 4 | $a^0b^0 = 1$ | 1 |
| 5 | $a^1b^1 = ab$ | 2 |
| 6 | $a^1b^0 = a$ | 2 |
| 7 | $a^0b^0 = 1$ | 2 |
| 8 | $a^0b^1 = b$ | 2 |
| 9 | $a^0b^0 = 1$ | 3 |
| 10 | $a^0b^1 = b$ | 3 |
| 11 | $a^1b^0 = a$ | 3 |
| 12 | $a^1b^1 = ab$ | 3 |
| 13 | $a^0b^1 = b$ | 4 |
| 14 | $a^1b^1 = ab$ | 4 |
| 15 | $a^0b^0 = 1$ | 4 |
| 16 | $a^1b^0 = a$ | 4 |

Tabla 12: Experimentos Realizados

Capítulo 3

Resultados Experimentales

Introducción

En este capítulo se presentaran los resultados experimentales obtenidos de la caracterización de cada uno de los elementos del sistema, así como las del sistema en su totalidad. Para este fin dividiremos el capítulo en dos secciones, una primera sección en donde presentaremos los resultados de la caracterización de cada uno de los elementos del sistema y una segunda sección en donde presentaremos los resultados de la caracterización del sistema de plasma usado y el respectivo test de hipótesis.

3.1. Caracterización de los elementos individuales

3.1.1. 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 $r_0 = 0.06 \Omega$ y $D_0 = 0.61 \text{ mm}$.

| Corrida | Resistencia(Ω) | Diámetro (mm) |
|---------|-------------------------|---------------|
| 1 | 0.06 | 0.61 |
| 2 | 0.06 | 0.61 |
| 3 | 0.06 | 0.61 |
| 4 | 0.06 | 0.61 |
| 5 | 0.06 | 0.61 |
| 6 | 0.06 | 0.61 |
| 7 | 0.06 | 0.61 |
| 8 | 0.06 | 0.61 |
| 9 | 0.06 | 0.61 |
| 10 | 0.06 | 0.61 |
| 11 | 0.06 | 0.61 |
| 12 | 0.06 | 0.61 |
| 13 | 0.06 | 0.61 |
| 14 | 0.06 | 0.61 |
| 15 | 0.06 | 0.61 |
| 16 | 0.06 | 0.61 |
| Media | 0.06 | 0.61 |

Tabla 13: Medidas diámetro y resistencia

Los resultados muestran que no existen diferencias significativas entre los valores medios de resistencia y diámetro, permitiendo aceptar la hipótesis de que las medidas son iguales para ambas propiedades.

3.1.2. 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 Ilustración 32 y 33. De las medidas realizadas se concluyo que el sistema posee una relación de ganancia de aproximadamente $1:20 \pm 0.6\%$.

Para el amplificador de aislamiento AD202 se obtuvieron los resultados presentados en la Ilustración 34 y 35. De las medidas realizadas se concluyo que esta parte del sistema posee una relación de ganancia de aproximadamente $1:1 \pm 0.2\%$.

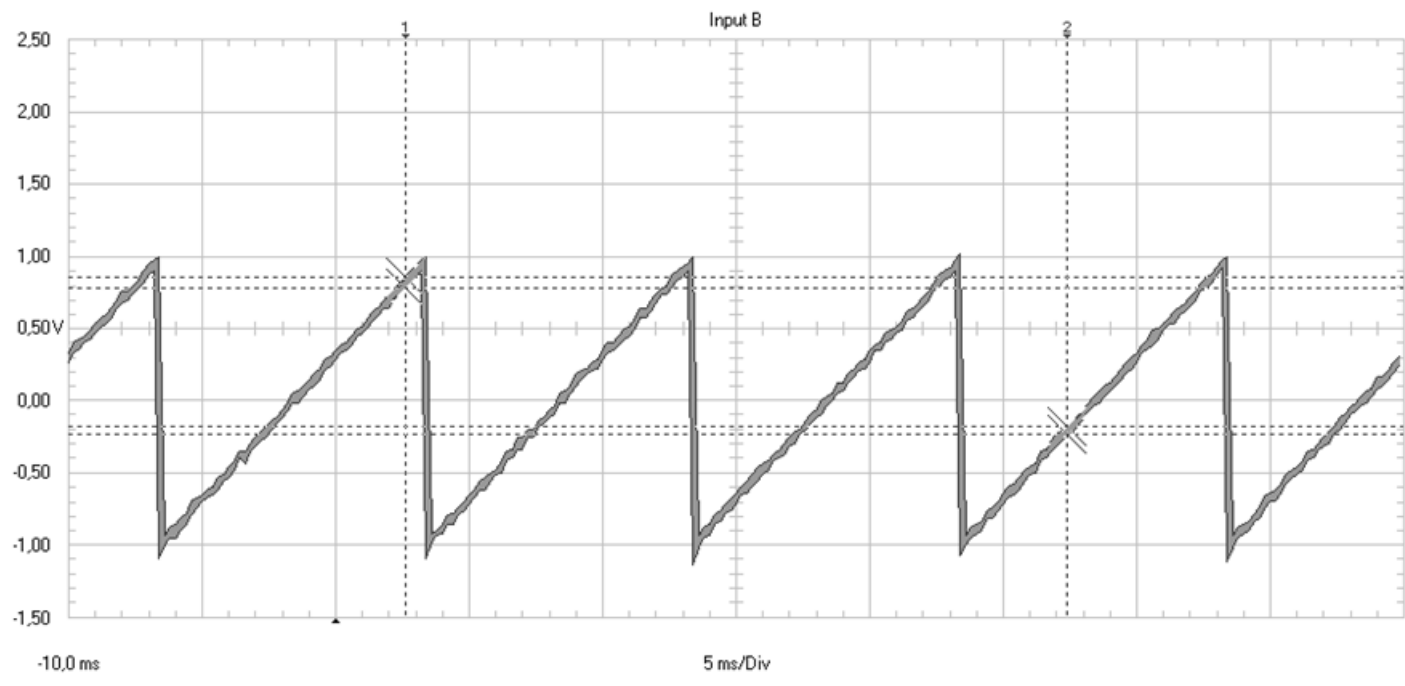


Ilustración 32: Entrada Amplificador LM3886 - 1V PP 80 Hz

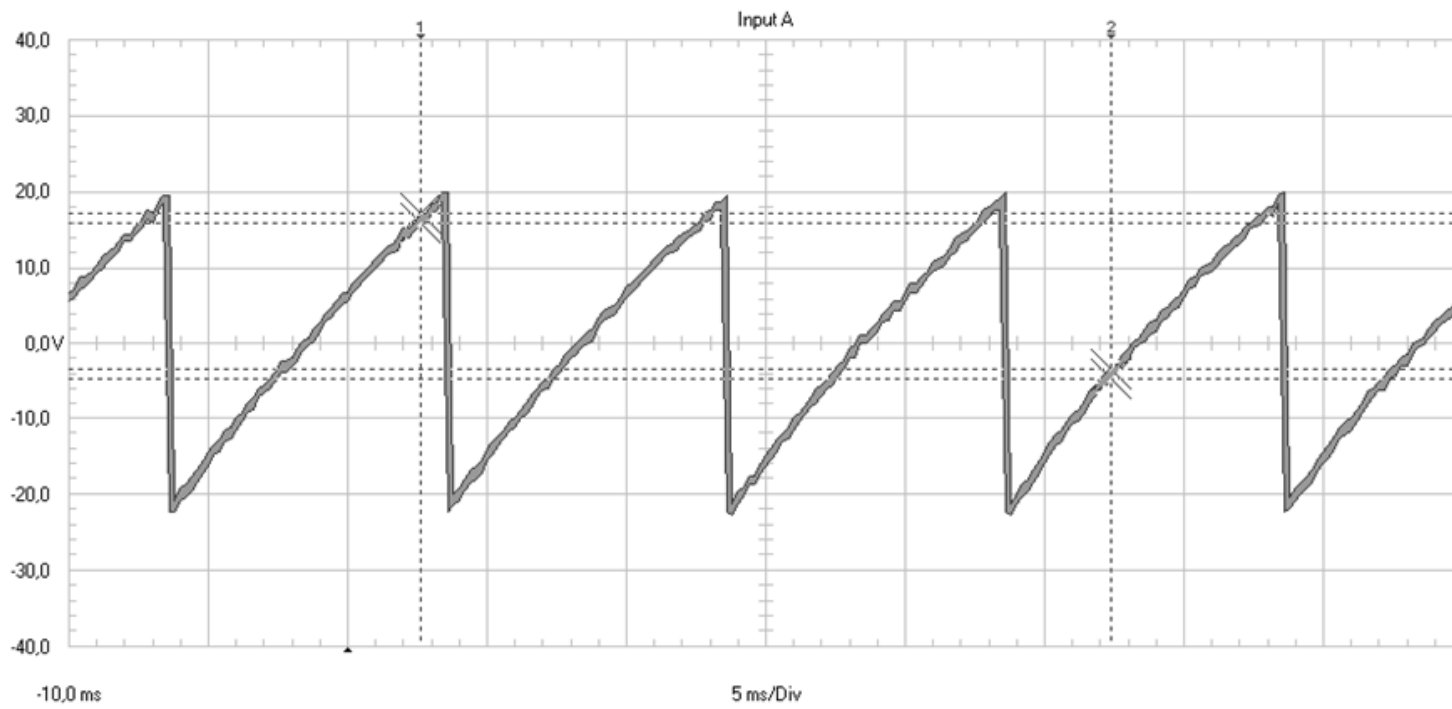


Ilustración 33: Salida Amplificador LM3886 - 20V PP 80 Hz

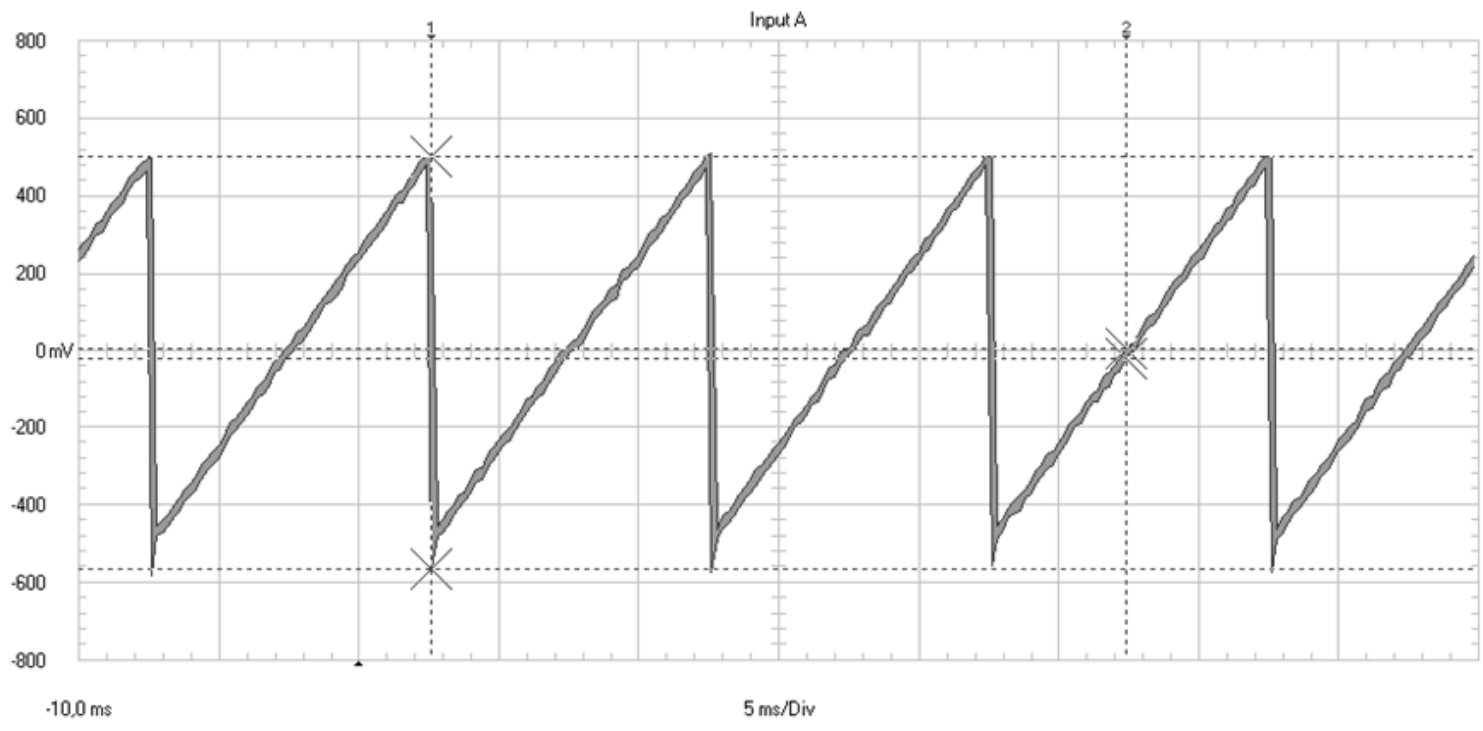


Ilustración 34: Entrada Amplificador AD202 - 500V PP 80 Hz

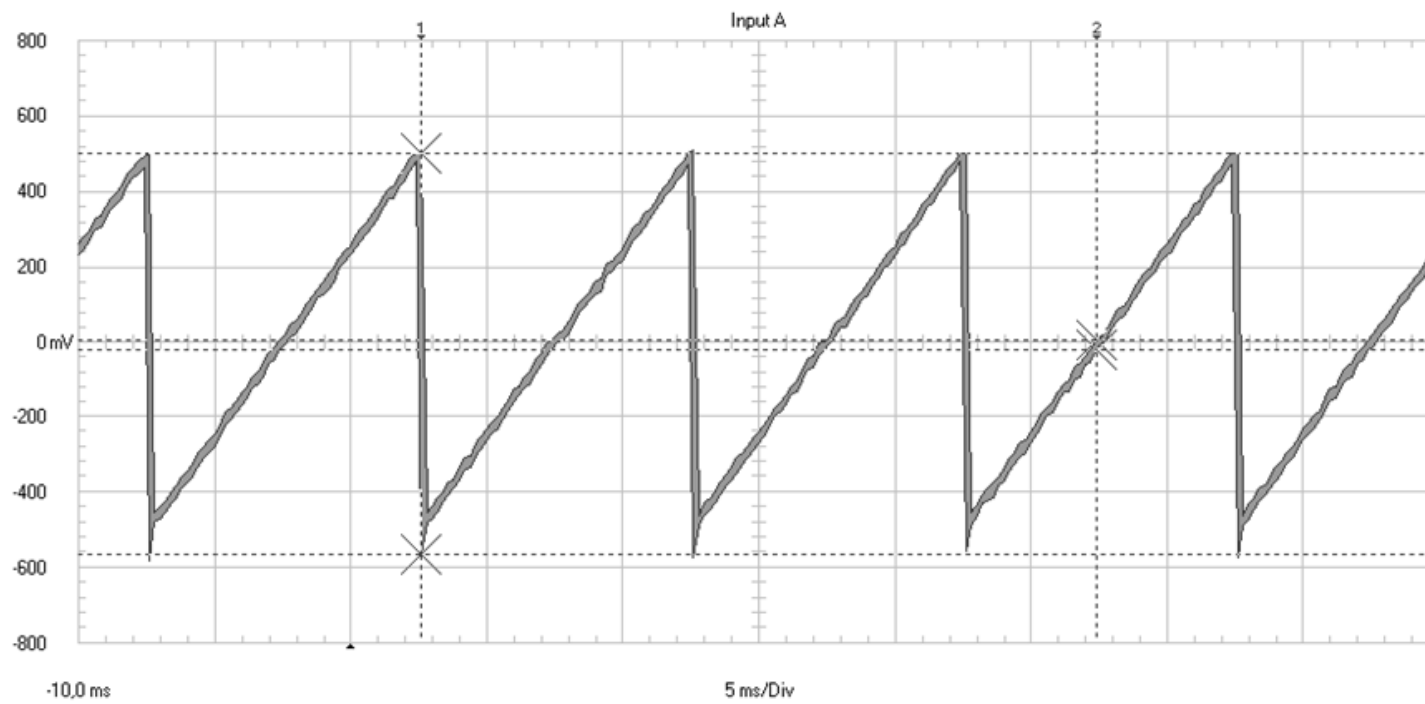


Ilustración 35: Salida Amplificador AD202 - 500V PP 80 Hz

3.1.3. Recolección y Procesamiento de Datos

Para el sistema de recolección y procesamiento de datos, 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 calculo el numero de muestras entre cada uno de los periodos de la señal. Los resultados se presentan en las Ilustraciones 36, 37, 38 y 39.

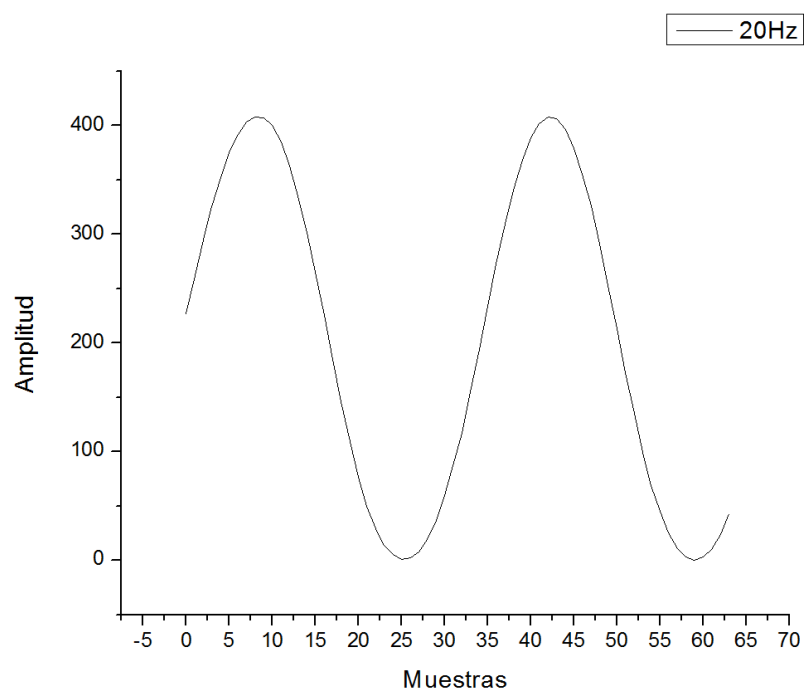


Ilustración 36: ADC 20Hz

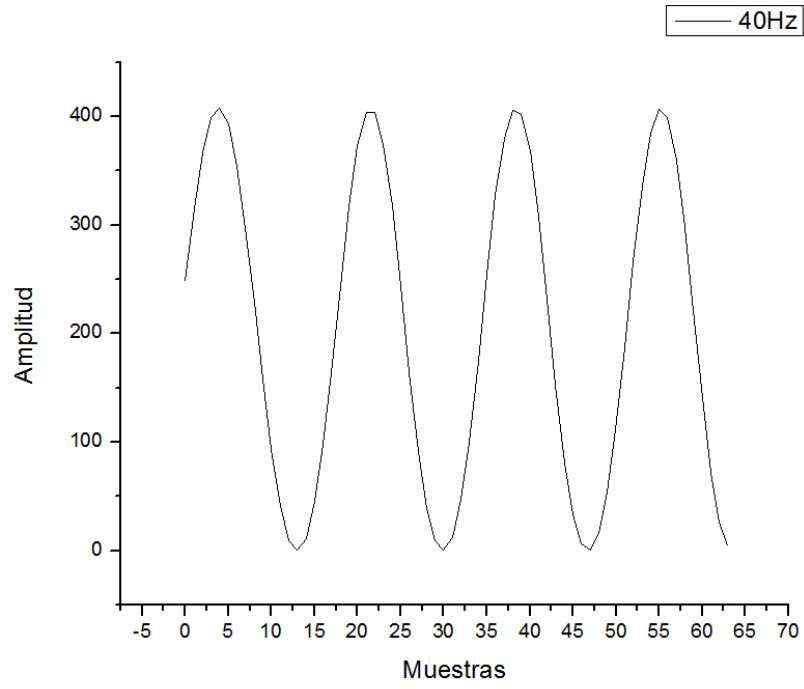


Ilustración 37: ADC 40Hz

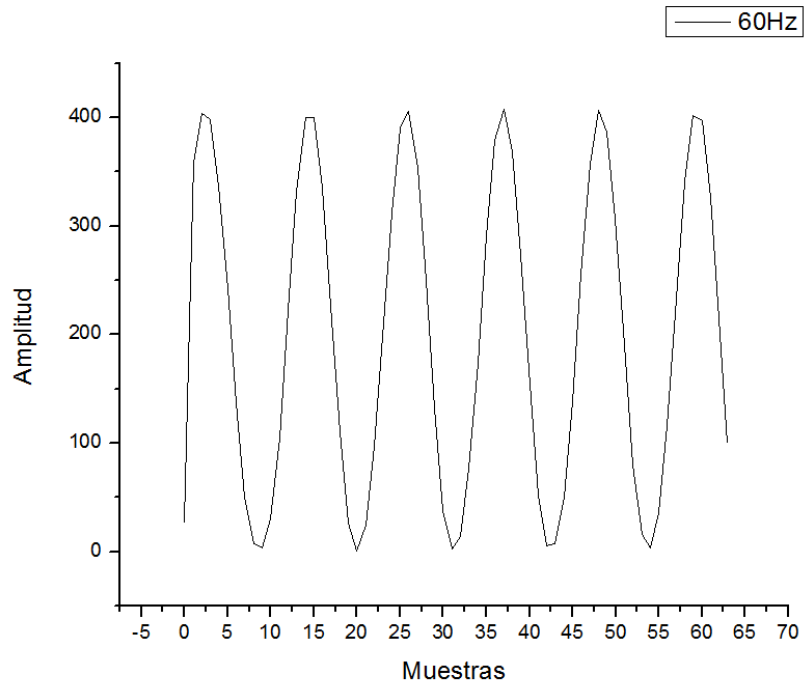


Ilustración 38: ADC 60Hz

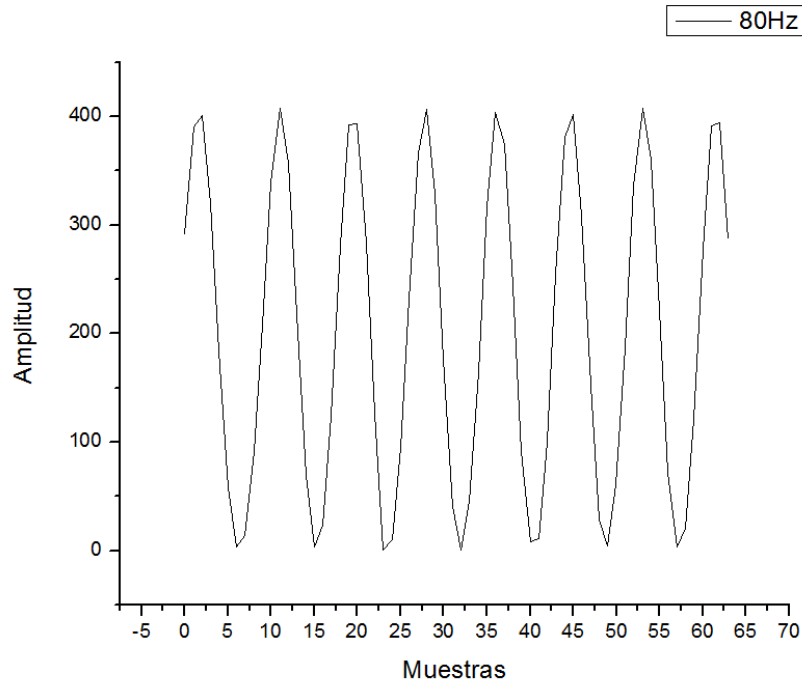


Ilustración 39: ADC 80Hz

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 $113,12\text{Hz}$, 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 .

3.2 Resultados de las Medidas Realizadas.

3.2.1. Resultados

Para las medidas realizadas en el reactor de plasma, la cámara fue evacuada hasta alcanzar una presión de fondo de $7,8 \times 10^{-3}\text{ Torr}$, posteriormente se estableció un flujo de argón hasta alcanzar una presión de $3.5 \times 10^{-1}\text{ Torr}$ (flujo 10 ccm) y $5.5 \times 10^{-1}\text{ Torr}$ (flujo de 20 ccm) respectivamente. La potencia fue aplicada al sistema durante 20 segundos y en cada una de las medidas esta se mantuvo constante (Ilustración 40).

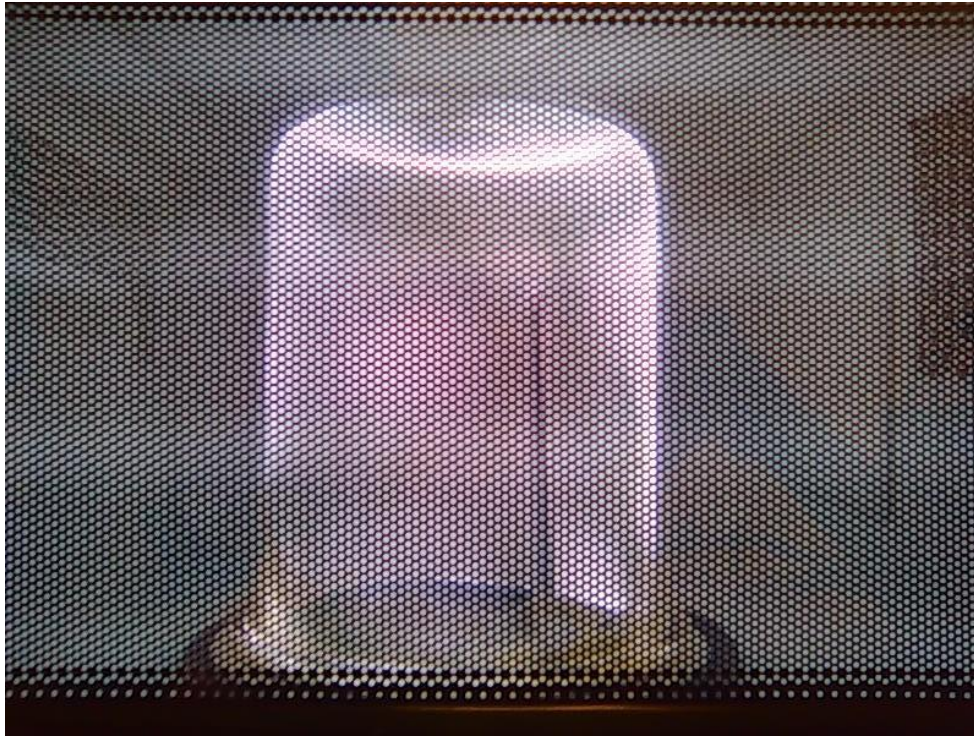


Ilustración 40: Medida realizada

La sonda fue ubicada en 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 $\pm 40V$.

Como se definió en la sección 2.3.2 los parámetros variados en los experimentos, fueron la presión del sistema a la cual definimos como Factor A y voltaje de prueba al que definimos como Factor B, los niveles son presentados en la Tabla 14.

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

Tabla 14: Factores y Niveles del experimento

Los resultados experimentales obtenidos para cada uno de los experimentos están tabulados en la tabla 15:

| Corrida | Tratamiento | Replica | Resultado |
|---------|---------------|---------|----------------------|
| 1 | $a^1b^0 = a$ | 1 | $7,49 \times 10^4 K$ |
| 2 | $a^0b^1 = b$ | 1 | $1,26 \times 10^5 K$ |
| 3 | $a^1b^1 = ab$ | 1 | $4,38 \times 10^4 K$ |
| 4 | $a^0b^0 = 1$ | 1 | $9,45 \times 10^4 K$ |
| 5 | $a^1b^1 = ab$ | 2 | $3,44 \times 10^4 K$ |
| 6 | $a^1b^0 = a$ | 2 | $8,22 \times 10^4 K$ |
| 7 | $a^0b^0 = 1$ | 2 | $1,15 \times 10^5 K$ |
| 8 | $a^0b^1 = b$ | 2 | $9,34 \times 10^4 K$ |
| 9 | $a^0b^0 = 1$ | 3 | $8,45 \times 10^4 K$ |
| 10 | $a^0b^1 = b$ | 3 | $8,25 \times 10^4 K$ |
| 11 | $a^1b^0 = a$ | 3 | $8,31 \times 10^4 K$ |
| 12 | $a^1b^1 = ab$ | 3 | $6,22 \times 10^4 K$ |
| 13 | $a^0b^1 = b$ | 4 | $1,04 \times 10^5 K$ |
| 14 | $a^1b^1 = ab$ | 4 | $5,12 \times 10^4 K$ |
| 15 | $a^0b^0 = 1$ | 4 | $9,21 \times 10^4$ |
| 16 | $a^1b^0 = a$ | 4 | $7,81 \times 10^4 K$ |

Tabla 15: Resultados

A partir de estos resultados procederemos a realizar el test de hipótesis propuesto en la sección 2.3.3.

3.2.1.1. Test de Hipótesis

| Tratamiento | Replica | | | | Estadísticos descriptivos | | |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------------------------------|--------------|---------------------------|----------------------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | Media | Desviación | Varianza |
| a | 7,49E+04 | 8,22E+04 | 8,31E+04 | 7,81E+04 | 7,96E+04 | 3,80E+03 | 1,44E+07 |
| b | 1,26E+05 | 9,34E+04 | 8,25E+04 | 1,04E+05 | 1,01E+05 | 1,86E+04 | 3,44E+08 |
| ab | 4,38E+04 | 3,44E+04 | 6,22E+04 | 5,12E+04 | 4,79E+04 | 1,18E+04 | 1,38E+08 |
| 1 | 9,45E+04 | 1,15E+05 | 8,45E+04 | 9,21E+04 | 9,65E+04 | 1,30E+04 | 1,70E+08 |
| Efecto | | | Cuadrado Medio del Efecto | | | Cuadrado Medio Error | |
| a | b | ab | a | b | ab | 5,52E+07 | |
| -8,82E+03 | -3,34E+03 | -4,58E+03 | 3,11E+08 | 4,46E+07 | 8,38E+07 | | |
| Estadístico de Prueba F0 | | | F de la Distribución Fisher (2/6) | | | | |
| a | b | ab | $\alpha=0.1$ | $\alpha=0.5$ | $\alpha=0.025$ | | |
| 5,63E+00 | 8,08E-01 | 1,52E+00 | 3,78 | 5,143 | 7,268 | | |

Tabla 16: Tabla ANOVA

De esta información 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.
- Los efectos causados por el factor B y por la interacción entre A y B combinados, no es estadísticamente significativa.

3.2.2. Curvas obtenidas

Las curvas son semejantes a las reportadas en la literatura (Ilustraciones 41 y 42), 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 las Ilustraciones 43 y 44. Este efecto es debido a que el voltaje de polarización de las sondas en ese caso no fue lo suficiente mente alto para alcanzar estas regiones.

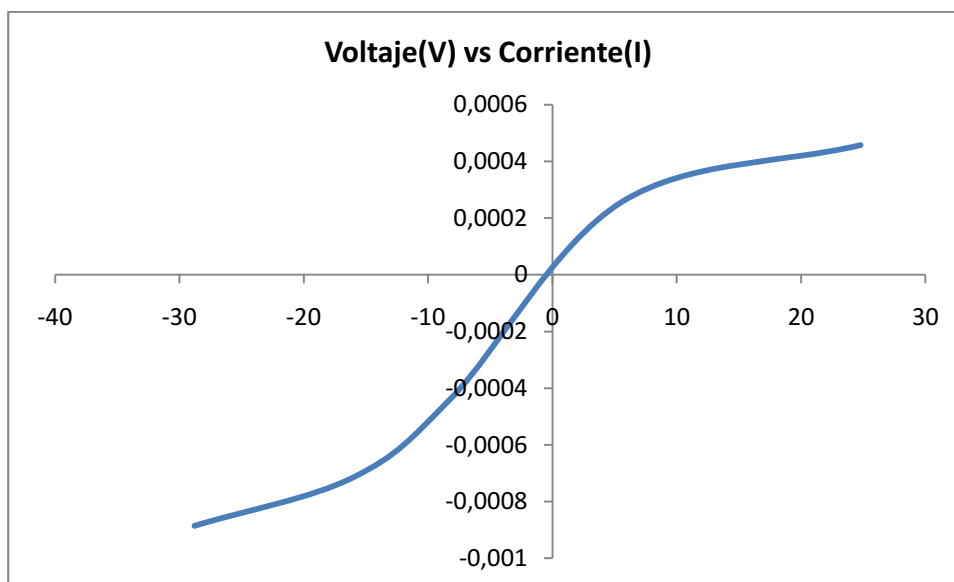


Ilustración 41: Resultado tratamiento a^1b^0

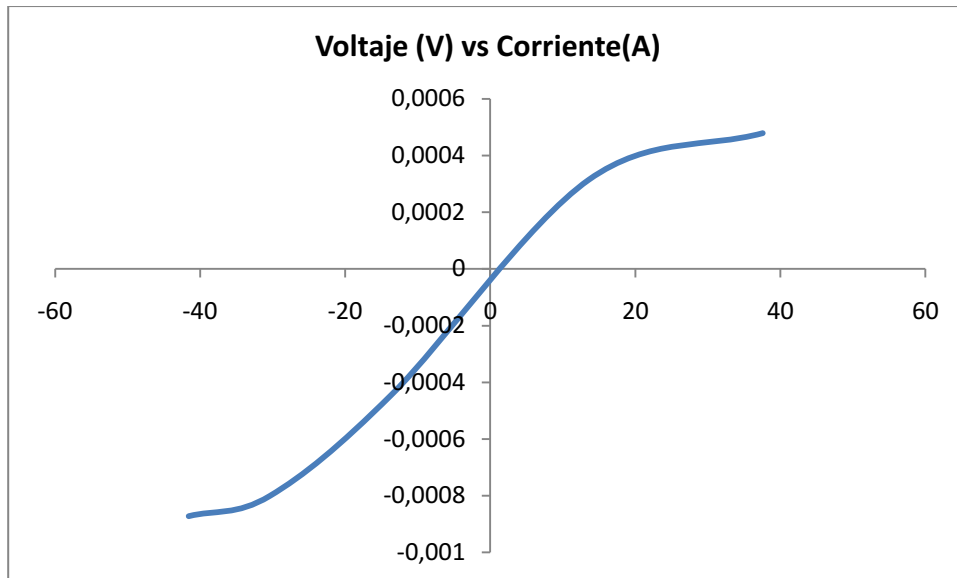


Ilustración 42: Resultado tratamiento $a^0 b^1$

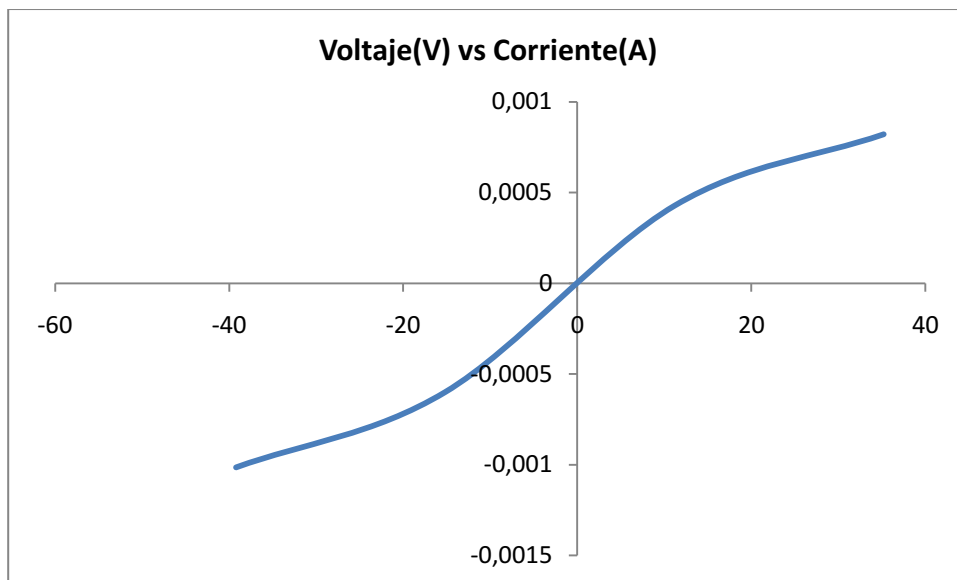


Ilustración 43: Resultados tratamiento $a^1 b^1$

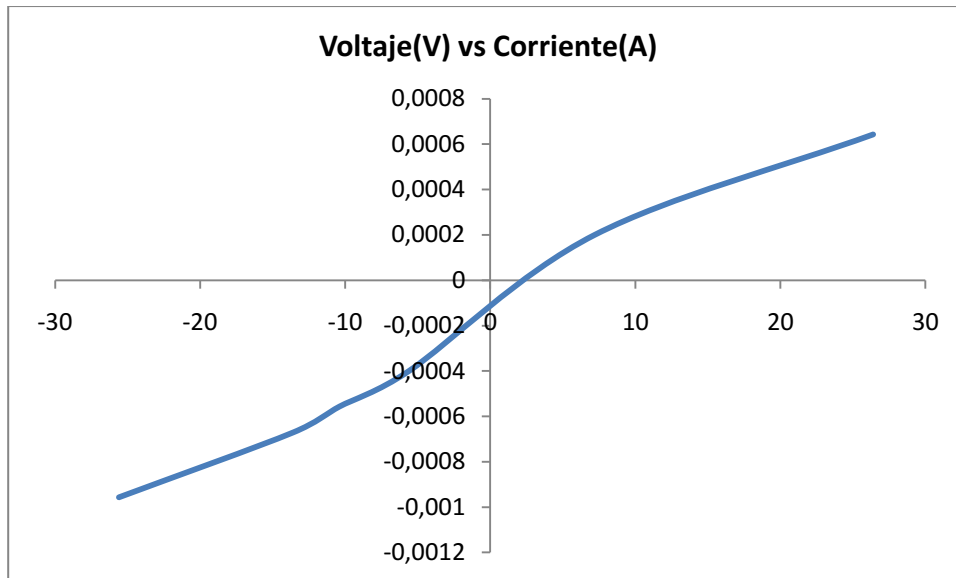


Ilustración 44: Resultados tratamiento $a^0 b^0$

Es importante anotar que el laboratorio de Física Aplicada no dispone de otra técnica de caracterización de plasma que permitan comparar los resultados aquí obtenidos, sin embargo, se puede observar de las curvas anteriores, las 3 regiones de interés que permiten estudiar un sistema de plasma, luego, la metodología propuesta para la implementación de la sonda, así como los circuitos asociados a la misma presentan resultados adecuados.

De acuerdo con la teoría, el voltaje de polarización al ser un factor externo del plasma no altera las medidas de forma significativa, El test de hipótesis planteado como mecanismo para validar indirectamente la funcionalidad de la sonda, mostro que efectivamente la respuesta del sistema no depende significativamente del voltaje de polarización.

De otro lado, los experimentos se realizaron en un reactor cuya fuente de generación de plasma son las microondas, lo que impone ciertos requisitos a la sonda, entre ellos el encapsulamiento. De los resultados se ve que el encapsulamiento realizado funciona en este tipo de reactores de plasma.

Se debe tener en cuenta que el amplificador propuesto en el circuito de polarización no es el mejor, dado que su voltaje de operación es limitada y por esta razón no siempre es posible alcanzar el voltaje de saturación.

Capítulo 4

Conclusiones y Trabajos Futuros

4.1 Conclusiones

La implementación de un sistema de caracterización de plasma por método electrostático implicó la unión de varios campos del conocimiento: Física, instrumentación y programación.

El modelo matemático usado para la interpretación de los datos arrojó resultados plausibles en las medidas de temperatura electrónicas del sistema. Aunque estos resultados no fueron comparados con otros resultados, el test de hipótesis planteado para estos, corroboraron el comportamiento predicho por el modelo.

La implementación del sistema de adquisición de datos basada en microcontroladores 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.

4.2 Trabajos Futuros

Si bien se obtuvieron resultados satisfactorios del sistema, este aun depende de algunos elementos externos como es el caso de fuentes y el generador de señales. Una futura implementación podría consistir en la construcción de fuentes específicas para esta aplicación, que permitan al sistema ser completamente independiente de otros dispositivos.

Por otra parte el mecanismo de disparo del sistema implementado para este sistema es manual, teniendo en cuenta que para la comunicación y la adquisición de datos se usaron microcontroladores, este sistema de disparo podría implementarse directamente desde el computador por medio del mismo protocolo de comunicación usado para la transmisión de los datos.

La interpretación de los datos obtenidos para esta implementación fue realizada haciendo uso del software Excel- La recolección de los datos se realizo empleando el software LabView, una futura mejora podría contar con el desarrollo de una aplicación independiente, ya sea desarrollada en base a uno de estos dos paquetes de software o a uno completamente independiente, que pudiera realizar ambas tareas.

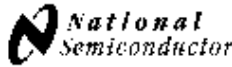
Bibliografía

- A. Brockhaus, D. K. (1995). Characterization of a microwave plasma by in situ diagnostics. *Surface and Coatings Technology* , 74-75.
- Antoine Descoeur, C. H. (2004). Optical emission spectroscopy of electrical discharge machining plasma. *Journal of Materials Processing Technology* 149 , 184–190.
- AZOOZ, A. (2006). Analog Data Acquisition for Obtaining I–V Characteristics Using Sound Cards. *IEEE - COMPUTING IN SCIENCE & ENGINEERING JOURNAL* , 10-15.
- Cirino, G. A. (1998). *CARACTERIZAÇÃO DE PLASMAS EMPREGANDO A TÉCNICA DE SONDA ELETROSTÁTICA*. São Paulo - Brasil: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- D. Homfray, B. C. (2007). A novel system for the direct measurement of the electron energy distribution function by Langmüir probe in ion sources. *Fusion Engineering and Design* 82 , 829-835.
- G.Murakami. (2007). *Estudos em plasmas gerados em sistemas de magnetron para deposicao de nitreto de aluminio en baixa temperatura*. Sao Jose Dos Campos - Brasil: ITA.
- Grey, J. (1969). *Patent No. 3,457.039*. United States of America.
- Hopkins, M. (1994). *Patent No. 7.015,703B2*. United States of America.
- J Wild, P. K. (2002). Langmüir Probe Measurement of the Electron Temperature in the Plasma Plume Formed by Pulsed Laser Deposition of Bi-Sr-Ca-Ca-O. *Departament of Electronic and Vacuum Physics, Charles University* .
- Kim, C.-K. (2004). Analysis of Langmüir Probe Data in High Density Plasmas. *Korean J. Chem. Eng* 21 , 746-751.
- KIM, S.-Y. (1997). Characterization of an argon magnetron plasma by a cylindrical Langmüir probe. *JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE LETTERS* , 547-549.
- M.A. Naveed, N. R. (2008). Langmüir probe and spectroscopic studies of RF generated helium-nitrogen mixture plasma. *The European Physical Journal* , 395-402.

- Pulido, H. G. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. Mexico DF - Mexico: McGraw-Hill.
- R. Shariatzadeh, E. G. (2009). Design and Fabrication of a Movable Langmüir Probe for Plasma Edge Parameters Measurement in the IR-T1 Tokamak. *J Fusion Energy* - 28 , 296–299.
- Rhijn, E. S. (2008). *Design and development of a double Langmüir probe to characterize a low-pressure microwave-generated Argon plasma*. Medellin - Colombia: EAFIT-TUDelf.
- Rodrigo, A. (2004). Procesamiento de materiales por Plasma: Conceptos introductorios. *Séptimo curso latinoamericano de procesamiento de materiales por plasma*,. Buenos Aires - Argentina.
- Rodríguez, A. (2003). *Artefactos: Diseño Conceptual*. Medellin: Editorial Universidad EAFIT.
- Roth, J. R. (2003). *Industrial plasma engineering: Volume 2*. London - UK: IOP Publishing.
- S. Dietrich, S. C.-K. (2007). Electrical probes for electron energy distribution function (EEDF) measurements in low pressure hydrogen plasmas. *28° ICPiG*. Prague - Czech Republic.
- Szuszczewicz, E. (1977). *Patent No. 4.006.004*. United States of America.
- T.N Hansen, J. S. (1999). Langmüir probe study of plasma expansion in pulsed laser ablation. *Appl. Phys A* 69 , 601-604.

Anexos

Anexo – Datasheet LM3886



October 2003

LM3886 Overture™ Audio Power Amplifier Series High-Performance 68W Audio Power Amplifier w/Mute

General Description

The LM3886 is a high-performance audio power amplifier capable of delivering 68W of continuous average power to a 4Ω load and 38W into 8Ω with 0.1% THD+N from 20Hz–20kHz.

The performance of the LM3886, utilizing its Self Peak Instantaneous Temperature (™) (SPIKe™) protection circuitry, puts it in a class above discrete and hybrid amplifiers by providing an inherently, dynamically protected Safe Operating Area (SOA). SPIKe protection means that these parts are completely safeguarded at the output against over-voltage, undervoltage, overloads, including shorts to the supplies, thermal runaway, and instantaneous temperature peaks.

The LM3886 maintains an excellent signal-to-noise ratio of greater than 92dB with a typical low noise floor of 2.0μV. It exhibits extremely low THD+N values of 0.03% at the rated output into the rated load over the audio spectrum, and provides excellent linearity with an IMD (SMPTE) typical rating of 0.004%.

Features

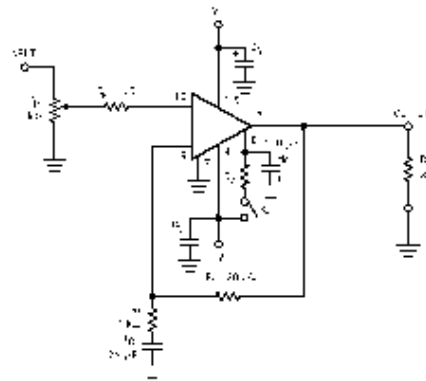
- 68W cont. avg. output power into 4Ω at $V_{CC} = \pm 28V$
- 38W cont. avg. output power into 8Ω at $V_{CC} = \pm 28V$
- 50W cont. avg. output power into 8Ω at $V_{CC} = \pm 35V$

- 135W instantaneous peak output power capability
- Signal-to-Noise Ratio $\geq 92dB$
- An input mute function
- Output protection from a short to ground or to the supplies via internal current limiting circuitry
- Output over-voltage protection against transients from inductive loads
- Supply under-voltage protection, not allowing internal biasing to occur when $|V_{EE}| + |V_{CC}| \leq 12V$, thus eliminating turn-on and turn-off transients
- 11-lead TO-220 package
- Wide supply range 20V - 94V

Applications

- Component stereo
- Compact stereo
- Self-powered speakers
- Surround-sound amplifiers
- High-end stereo TVs

Typical Application



*Optional components dependent upon specific design requirements. Refer to the External Components Description section for a component functional description.

FIGURE 1. Typical Audio Amplifier Application Circuit

Overture™ and SPIKe™ Protection are trademarks of National Semiconductor Corporation.

LM3886 Overture Audio Power Amplifier Series High-Performance 68W Audio Power Amplifier w/Mute

**FEATURES**

Small Size: 4 Channels/Inch
Low Power: 35 mW (AD204)
High Accuracy: $\pm 0.025\%$ Max Nonlinearity (K Grade)
High CMR: 130 dB (Gain = 100 V/V)
Wide Bandwidth: 5 kHz Full-Power (AD204)
High CMV Isolation: ± 2000 V pk Continuous (K Grade)
 (Signal and Power)
Isolated Power Outputs
Uncommitted Input Amplifier

APPLICATIONS

Multichannel Data Acquisition
Current Shunt Measurements
Motor Controls
Process Signal Isolation
High Voltage Instrumentation Amplifier

GENERAL DESCRIPTION

The AD202 and AD204 are general purpose, two-port, transformer-coupled isolation amplifiers that may be used in a broad range of applications where input signals must be measured, processed, and/or transmitted without a galvanic connection. These industry standard isolation amplifiers offer a complete isolation function, with both signal and power isolation provided for in a single compact plastic SIP or DIP style package. The primary distinction between the AD202 and the AD204 is that the AD202 is powered directly from a 15 V dc supply while the AD204 is powered by an externally supplied clock, such as the recommended AD246 Clock Driver.

The AD202 and AD204 provide total galvanic isolation between the input and output stages of the isolation amplifier through the use of internal transformer-coupling. The functionally complete AD202 and AD204 eliminate the need for an external, user-supplied dc-to-dc converter. This permits the designer to minimize the necessary circuit overhead and consequently reduce the overall design and component costs.

The design of the AD202 and AD204 emphasizes maximum flexibility and ease of use, including the availability of an uncommitted op amp on the input stage. They feature a bipolar ± 5 V output range, an adjustable gain range of from 1V/V to 100 V/V, $\pm 0.025\%$ max nonlinearity (K grade), 130 dB of CMR, and the AD204 consumes a low 35 mW of power.

The functional block diagrams can be seen in Figures 1a and 1b.

PRODUCT HIGHLIGHTS

The AD202 and AD204 are full-featured isolators offering numerous benefits to the user:

Small Size: The AD202 and AD204 are available in SIP and DIP form packages. The SIP package is just 0.25" wide, giving the user a channel density of four channels per inch. The isolation barrier is positioned to maximize input to output spacing. For applications requiring a low profile, the DIP package provides a height of just 0.350".

High Accuracy: With a maximum nonlinearity of $\pm 0.025\%$ for the AD202K/AD204K ($\pm 0.05\%$ for the AD202J/AD204J) and low drift over temperature, the AD202 and AD204 provide high isolation without loss of signal integrity.

Low Power: Power consumption of 35 mW (AD204) and 75 mW (AD202) over the full signal range makes these isolators ideal for use in applications with large channel counts or tight power budgets.

Wide Bandwidth: The AD204's full-power bandwidth of 5 kHz makes it useful for wideband signals. It is also effective in applications like control loops, where limited bandwidth could result in instability.

Excellent Common-Mode Performance: The AD202K/AD204K provide ± 2000 V pk continuous common-mode isolation, while the AD202J/AD204J provide ± 1000 V pk continuous common-mode isolation. All models have a total common-mode input capacitance of less than 5 pF inclusive of power isolation. This results in CMR ranging from 130 dB at a gain of 100 dB to 104 dB (minimum at unity gain) and very low leakage current (2 μ A maximum).

Flexible Input: An uncommitted op amp is provided at the input of all models. This provides buffering and gain as required, and facilitates many alternative input functions including filtering, summing, high voltage ranges, and current (transimpedance) input.

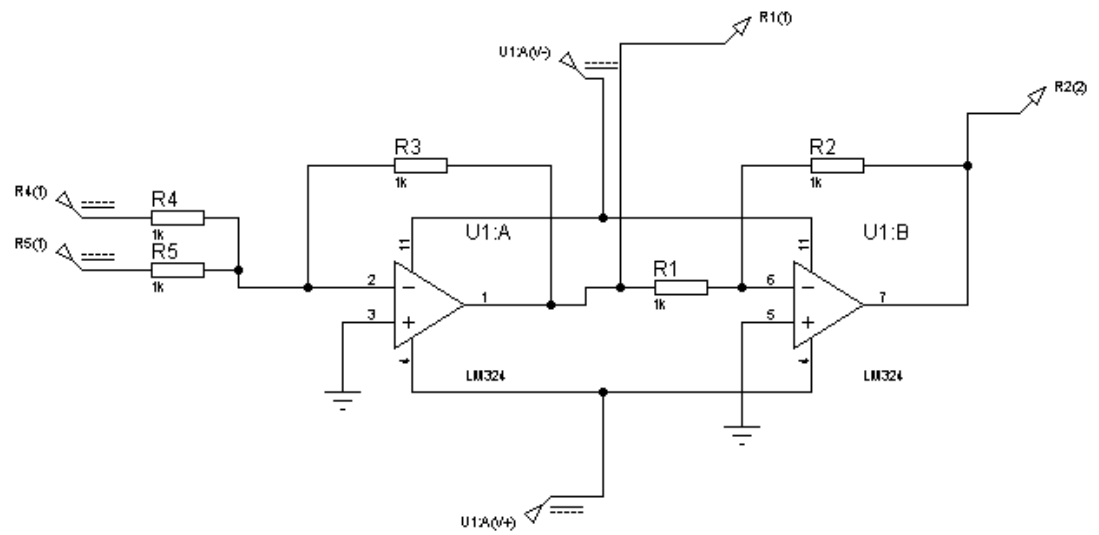
Isolated Power: The AD204 can supply isolated power of ± 7.5 V at 2 mA. This is sufficient to operate a low-drift input preamp, provide excitation to a semiconductor strain gage, or power any of a wide range of user-supplied ancillary circuits. The AD202 can supply ± 7.5 V at 0.4 mA, which is sufficient to operate adjustment networks or low power references and op amps, or to provide an open-input alarm.

REV. D

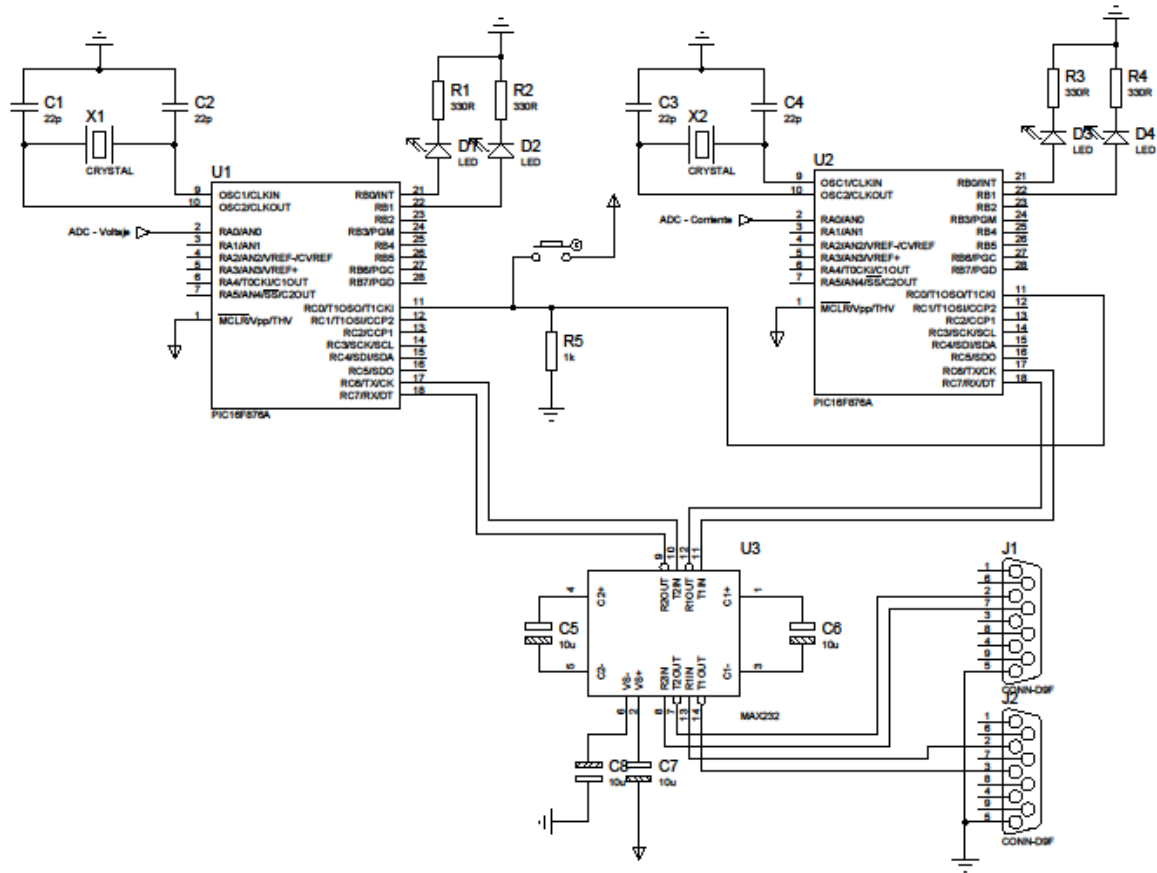
Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.
 Tel: 781/328-4700 www.analog.com
 Fax: 781/326-8703 © Analog Devices, Inc., 2002

Anexo - Circuito Offset

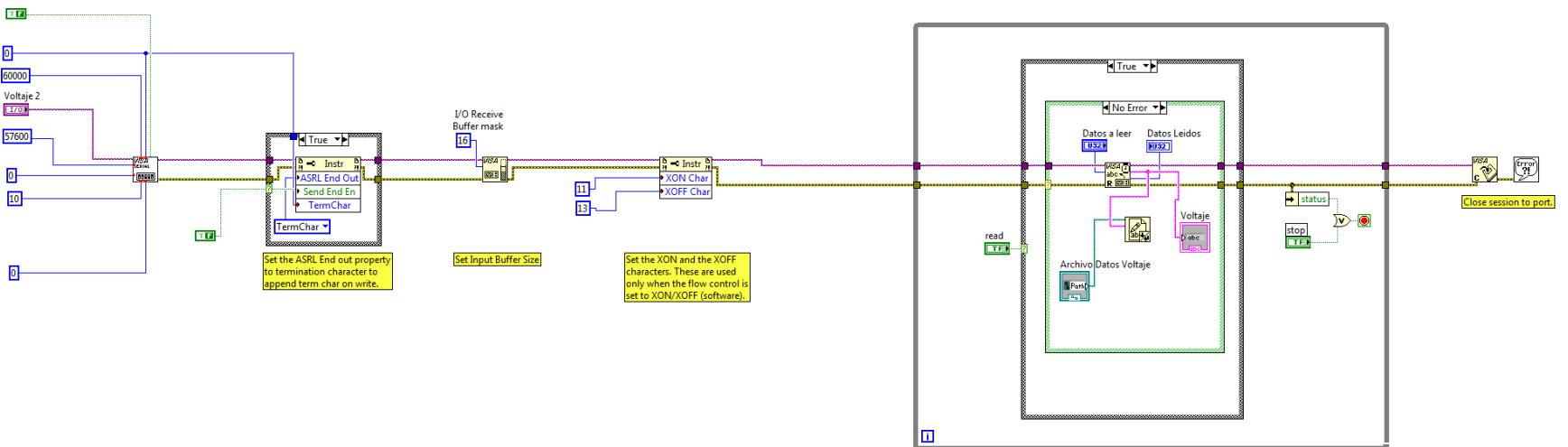
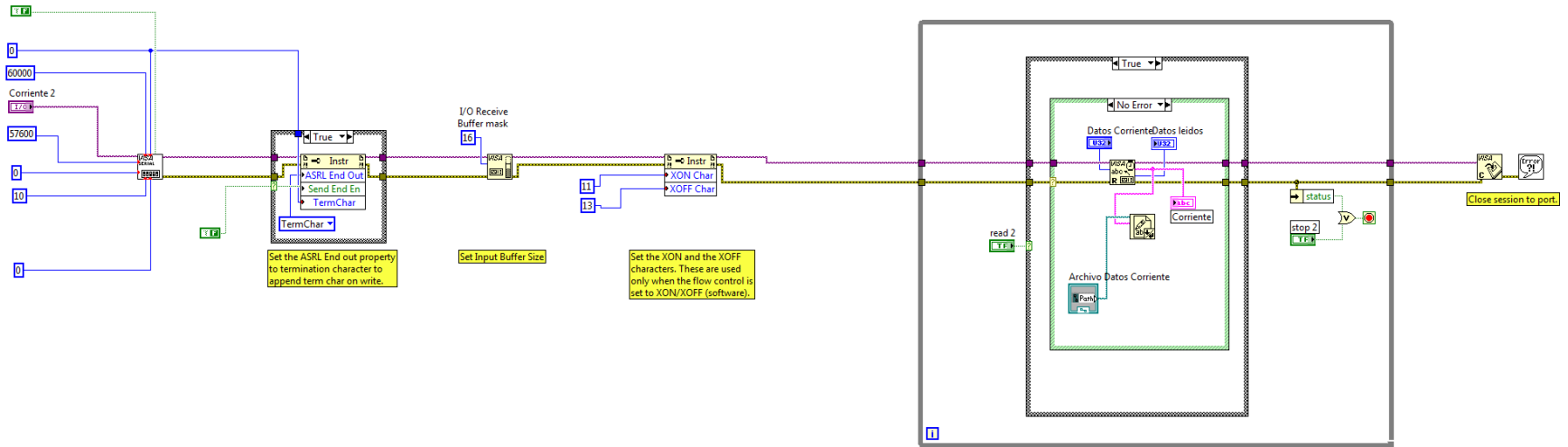


Anexo - Circuito ADC



Anexo – Interface LabView





Anexo – Programa Microcontrolador

```
#include <16F876a.h>
#device adc=10
#use delay(clock=2000000)
#use rs232(baud=57600,xmit=pin_c6,rcv=pin_c7,bits=8)
#fuses hs,noprotect,nowdt,nobrownout,put,nolvp
#byte porta=5
#byte portb=6
#byte portc=7
#define Sinc portb,0
#define ledA portb,1
#define SW portc,0

int16 voltaje, dir;

void Lectura()
{
    set_adc_channel(0);
    delay_us(2);
    voltaje=read_adc();
    printf("%03lu,%04lu \n\r",dir,voltaje);
    dir=dir+1;
}

void main()
{
    set_tris_a(0B1111111);
    set_tris_b(0B11111100);
    set_tris_c(0B1011111);
    setup_adc_ports(all_analog);
    setup_adc(adc_clock_internal);
    bit_set(Sinc);
    bit_clear(ledA);
    while(true)
    {
        if(BIT_TEST(SW))
        {
            dir=1;
            while(dir<250)
            {
                Bit_clear(Sinc);
                Lectura();
                Bit_set(Sinc);
                Lectura();
            }
            bit_set(LedA);
            delay_ms(1000);
            bit_clear(ledA);
            bit_set(Sinc);
        }
    }
}
```

Anexo – Instrucciones de Tratamiento

Luego de obtener los datos del sistema de adquisición, estos son almacenados en los archivos *Lectura1.dat* para la corriente y *Lectura2.dat* para el voltaje. En estos archivos se encuentran los resultados de las mediciones organizadas en dos columnas separadas por coma. En la primera de las columnas se encuentran la información del tiempo representada en los números desde 001 hasta 250, en la siguiente columna se encuentra el número digital correspondiente al valor de voltaje medido, este número esta contenido entre 0000 y 1023 que corresponden a los escalones del conversor analógico digital.

En ambos casos esta información puede ser importada al programa Excel, desde el menú *Data > Get External Data > From Text* y siguiendo los pasos para la importación de datos separados por comas (CSV).

Para la construcción del valor de tiempo, los datos de la primera columna deben ser multiplicados por $4,42 \times 10^{-3}$ s para obtener el tiempo exacto. En el caso del voltaje debe ser multiplicado por $4,88 \times 10^{-3}$ V y posteriormente al valor obtenido restar el offset previamente medido. En el caso de la corriente, para obtener el valor, el voltaje medido es dividido por 560Ω . Con estos valores es posible la construcción de la curva I V a partir de estas columnas.

Esta curva I V inicial en todos los casos mostro la presencia de algunos valores atípicos, que pueden ser eliminados manualmente o usando la herramienta de análisis de Datos de Excel para la eliminación de Outliers. Posteriormente con estos datos filtrados es posible la construcción de una curva mucho más ajustada.

De esta curva procedemos a obtener los valores para construir la ecuación:

$$\frac{dI_t}{dV} = \frac{di_{i1}(V_{p1})}{dV} - \frac{i_{e,sat} \frac{eV_{p1}}{KT_e}}{2}$$

El primer termino $\frac{di_{it}}{dV}$ se extrae de la pendiente de la grafica en el intercepto cuando $f(V) = 0$. Esto se puede obtener interpolando la región B de la grafica con una línea recta y obteniendo el intercepto.

El termino $\frac{di_{i1}(V_{p1})}{dV}$ se obtiene extrapolando con una línea rectal la Región A de la grafica hasta $f(V) = f(V_{p1}) = 0$.

El valor del término $i_{e,sat}$ se obtiene calculando el valor promedio de la región C de la curva.

Finalmente los valores de T_e se obtuvieron despejando de la ecuación inicial.