

SISTEMA DE TRANSMISIÓN INALÁMBRICA DE DATOS PARA SONDA DE CAPTURA DE IONES

ANDRÉS FELIPE BUENO GÓMEZ



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA, COLOMBIA
2025

SISTEMA DE TRANSMISIÓN INALÁMBRICA DE DATOS PARA SONDA DE CAPTURA DE IONES

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista

Autor

ANDRÉS FELIPE BUENO GÓMEZ

Director

PH. D. PETR ANATOLIEVICH TSYGANKOV
Escuela de Física

Codirectores

PH. D. EDUARDO ALBERTO OROZCO OSPINO
Escuela de Física

PH. D. ERNESTO AGUILERA BERMÚDEZ
Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA, COLOMBIA

2025

A Aura, Eulogio y Alejandra.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander, mi *alma mater*, por brindarme los mejores años de mi vida y por hacer de mí el ciudadano y profesional que soy. Mi más profundo agradecimiento a esta casa de estudios, por abrirme las puertas y forjarme para superar los obstáculos presentados a lo largo de este camino, así como para afrontar los desafíos futuros.

A mi profesora de mecánica clásica, Diana Padilla, y a mi profesor de cálculo diferencial, Alberto Higuera, por sus extraordinarias metodologías de enseñanza y por su dedicación a fomentar el pensamiento crítico y objetivo en todos los ámbitos de la experiencia humana, ofreciendo cátedras excepcionales; y gracias a quienes descubrí mi amor por la física y las matemáticas.

A los profesores Petr Tsygankov, Eduardo Orozco y Ernesto Aguilera, por aceptar dirigirme en este trabajo, por el apoyo, la asistencia y la orientación que me brindaron en cada etapa; y por permitirme culminar esta fase de mi proyecto de vida en un entorno de ciencia.

Al profesor Fredy Parada, por su permanente disposición para orientarme durante la realización de este trabajo.

A Fabián Forero, Natalia Navarro y Leidy Vargas, por su invaluable amistad, extraordinarias experiencias vividas e incondicional apoyo; de quienes me siento orgulloso por sus logros personales y profesionales, y que me han honrado con su amistad.

A Laura Jiménez y Luis Carlos Navarro, mis mentores, cuyo ejemplo de profesionalismo y de rigor y criterio técnicos ha sido fuente constante de inspiración en mi proceso de crecimiento personal y profesional.

RESUMEN

TÍTULO: SISTEMA DE TRANSMISIÓN INALÁMBRICA DE DATOS PARA SONDA DE CAPTURA DE IONES.

Autor: Andrés Felipe Bueno Gómez.

Palabras clave: Transmisión, inalámbrica, datos, sonda, haz, iones, repulsión, retardo, frenado, Arduino, Bluetooth.

DESCRIPCIÓN: En este trabajo se expone de manera detallada un prototipo funcional de un sistema básico de transmisión de datos, por medio de Bluetooth, de lecturas analógicas de amplitud de señales de tensión asociadas a señales analógicas de potencial de repulsión e intensidad de corriente iónica. El objetivo principal es la implementación de este sistema en la ejecución de un método de caracterización de haces de iones que emplea una sonda de potencial de repulsión de múltiples electrodos.

En el capítulo 1 se presentan los conceptos fundamentales de los haces de iones, necesarios para comprender su naturaleza y comportamiento en general. En el capítulo 2 se presenta el análisis sobre el cual se basa un diseño representativo de una sonda de potencial de repulsión y la definición y el significado físico de la función de distribución de energía iónica a partir de la característica de potencial de repulsión $i^+ = f(E)$ que se obtiene con la sonda. En el capítulo 3 se expone detalladamente el diseño y funcionamiento del sistema de transmisión inalámbrica de datos, se presenta la herramienta de software desarrollada para el control del proceso de adquisición, transmisión, recepción y visualización de los datos en tiempo real; y se evalúa el desempeño del sistema en condiciones de exigencia propias de su implementación práctica. Por último, en el capítulo 4, se presentan las conclusiones y recomendaciones.

ABSTRACT

TITLE: WIRELESS DATA TRANSMISSION SYSTEM FOR ION CAPTURE PROBE.

Author: Andrés Felipe Bueno Gómez.

Key Words: Transmission, wireless, data, probe, beam, ions, potential, retarding, Arduino, Bluetooth.

DESCRIPTION: This work presents in detail a functional prototype of a basic data transmission system via Bluetooth, designed for the analog reading of voltage signal amplitudes associated with analog signals of retarding potential and ionic current intensity. The main objective is the implementation of this system in a characterization method for ion beams employing a multi-grid retarding potential probe.

Chapter 1 introduces the fundamental concepts of ion beams, necessary to understand their nature and behavior in general. Chapter 2 presents the analysis on which a representative design of a retarding potential probe is based, as well as the definition and physical meaning of the ion energy distribution function derived from the retarding potential characteristic $i^+ = f(E)$ obtained with the probe. Chapter 3 details the design and operation of the wireless data transmission system, presents the software tool developed for data acquisition, the acquisition process, transmission, reception, and real-time data visualization; and evaluates the system's performance under conditions demanding practical implementation. Finally, Chapter 4, presents the conclusions and recommendations.

Índice general

Introducción	1
1. Haces de iones	3
1.1. Carga espacial	4
1.2. Espacio de fases	5
1.3. Flujo de partículas	8
1.4. Densidad e intensidad de corriente eléctricas	8
1.5. Ley de Child-Langmuir	9
1.6. Grado de compensación	10
2. Sonda de potencial de repulsión	13
2.1. Diseño representativo de una sonda de potencial de repulsión	14
2.2. Característica de potencial de repulsión	20
3. Sistema de transmisión inalámbrica de datos	24
3.1. Tecnologías empleadas	24
3.2. Diseño	29
3.3. Construcción	40
3.4. Implementación	49
3.5. Montaje experimental mejorado	50
4. Conclusiones	52
Referencias	57

Índice de figuras

1.1. Representación de un haz de iones con geometría cilíndrica propagándose longitudinalmente a lo largo del eje z	4
1.2. Fuerzas netas de repulsión y de atracción sobre un ion del haz (basada en la figura 2 de <i>Space-Charge Effects</i> , de N. Chauvin, en <i>Ion Sources</i> , pp. 63-83, de R. Bailey).	4
1.3. Dispersión del haz a medida que avanza en el tiempo y el espacio (tomada de la figura 8 de Hernández, A., Maury, G. H. I., y García, M. C., <i>Diseño y construcción de una fuente de iones por medio de un reactor de plasma</i> [9]).	5
1.4. Los elementos de volumen de los espacios de configuración y de velocidad juntos constituyen un elemento de volumen $dV = drd\mathbf{v}$ en la posición (\mathbf{r}, \mathbf{v}) en el espacio de fases (basada en la figura 2.1 de <i>Introduction to Plasma Physics. C17 Lecture Notes</i> , de John Howard).	6
1.5. Proceso de compensación de carga espacial (basada en la figura 7 de <i>Space-Charge Effects</i> , de N. Chauvin, en <i>Ion Sources</i> , pp. 63-83, de R. Bailey).	10
1.6. Haz de iones uniforme con geometría cilíndrica propagándose a lo largo de un cavidad cilíndrica (basada en la figura 8 de <i>Space-Charge Effects</i> , de N. Chauvin, en <i>Ion Sources</i> , pp. 63-83, de R. Bailey).	11
2.1. Sonda para la medición de la intensidad de corriente de un haz de iones.	14
2.2. Sonda con electrodo de repulsión de electrones y una fuente de tensión CD variable conectada al electrodo de medición para controlar el flujo de iones.	16
2.3. Sonda con electrodo de apantallamiento para evitar la propagación de perturbaciones sobre el haz ocasionadas por el electrodo de repulsión.	17
2.4. Sonda con electrodo independiente para el control del potencial de repulsión.	18
2.5. Sonda con electrodo de supresión para evitar la emisión secundaria desde la superficie del electrodo de medición.	18
2.6. Variante de la sonda con trampa magnética para electrones.	19

2.7. Vista interna de la sonda de potencial de repulsión del Laboratorio de Física de Plasma de la Universidad Industrial de Santander (tomada de la figura H.7 de la tesis de doctorado <i>Elaboración y estudio de recubrimientos modulados de alta adhesión por flujos plásmicos</i> , del investigador Fredy Fabián Parada Becerra).	20
2.8. Curva de potencial de retardo normalizada y distribución de energía para un haz de iones generado por una fuente de iones electrostática con rejilla (tomadas de la figura 9.12 de <i>Industrial Ion Sources. Broadbeam Gridless Ion Source Technology</i> , de Viacheslav V. Zhurin).	21
2.9. Ejemplo del procesamiento de la señal característica de potencial de repulsión para la obtención de la IEDF con el software ProbeDAM (tomadas de la figura 2.13 de la tesis de doctorado <i>Elaboración y estudio de recubrimientos modulados de alta adhesión por flujos plásmicos</i> , del investigador Fredy F. Parada).	22
2.10. Espectros iónicos de flujos de vapor generados por cátodos de circonio y titanio (tomadas de las figuras 2.15 y 2.16 de la tesis de doctorado <i>Elaboración y estudio de recubrimientos modulados de alta adhesión por flujos plásmicos</i> , del investigador Fredy F. Parada).	23
3.1. Placa Arduino Nano. Fuente: Arduino Official Store.	26
3.2. Placa NANO.	26
3.3. Módulo Bluetooth HC-05	28
3.4. Esquema general simplificado del montaje experimental para la caracterización de un haz de iones implementando el SITID, el cual se integra a la sonda por medio del sistema de acondicionamiento de las señales de potencial de repulsión e intensidad de corriente iónica.	30
3.5. Esquema electrónico del sistema de acondicionamiento de las señales $v(t)$ e $i^+(t)$	30
3.6. Esquema de conexiones del SITID.	32
3.7. Ilustración de estructura de una trama de datos en comunicación serie por UART y el formato 8N1 utilizado por el SITID para la transmisión y recepción de los datos. El término «Idle» hace referencia al estado de reposo de la señal digital antes y después del envío (o recepción) de una trama de datos (figuras basadas en la figura titulada «Frame Format» de la sección <i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (UART)</i> de la documentación de aprendizaje de la página oficial de Arduino [19]).	34

3.8. Representación más general mediante diagramas de bloques de los sistemas de acondicionamiento de las señales de potencial de repulsión e intensidad de corriente iónica.	35
3.9. Interfaz gráfica de usuario en MATLAB.	38
3.10. Montaje experimental del prototipo del SITID sobre placa de pruebas. . . .	41
3.11. Esquema de conexiones para validar el funcionamiento del SITID. Los cursores de los potenciómetros proporcionan salidas de tensión entre 0 V y 5 V.	42
3.12. Montaje en placa de pruebas para validar el funcionamiento del SITID. . . .	43
3.13. Visualización de los datos recibidos en tiempo real.	43
3.14. Señales rectangulares de prueba.	44
3.15. Frecuencia de las señales medidas por el sistema.	46
3.16. Frecuencia de las señales medidas por el sistema.	46
3.17. Diseño de la PCB.	47
3.18. Vista superior del modelo 3D de la PCB del SITID.	47
3.19. Vista superior del modelo 3D de la PCBA del SITID.	48
3.20. Vista superior de la placa de circuito impreso ensamblada.	48
3.21. Resultados primera prueba de caracterización de un haz de iones.	49
3.22. Resultados segunda prueba de caracterización de un haz de iones.	50
3.23. Esquema general del nuevo montaje experimental propuesto para la caracterización de un haz de iones implementando el SITID que no requiere del uso de del sistema de acondicionamiento de las señales de potencial de repulsión e intensidad de corriente iónica de la figura 3.5.	51

Índice de tablas

3.1. Características principales de las tecnologías Bluetooth® (Fuente: Bluetooth® Technology Website).	27
3.2. Descripción de los elementos gráficos que componen la interfaz gráfica de usuario de MATLAB.	39
3.3. Frecuencias de las señales registradas por el sistema.	45

INTRODUCCIÓN

En las últimas dos décadas, las técnicas de elaboración de recubrimientos de superficies han suscitado un creciente interés en la ciencia de materiales y han adquirido gran importancia por sus numerosas aplicaciones industriales, lo cual se ha visto reflejado en el incremento del número de investigaciones publicadas anualmente sobre este tema. Estos recubrimientos son películas ultrafinas (generalmente un óxido cerámico, un nitruro o un carburo) formadas como resultado de reacciones químicas sobre una superficie denominada sustrato (comúnmente un acero aleado), en un proceso conocido como deposición de películas delgadas endurecedoras [16].

Una de las técnicas más utilizadas consiste en el calentamiento del sustrato para favorecer la difusión de los vapores de las especies químicas que forman el recubrimiento hacia el interior del material y promover la formación de enlaces químicos entre los átomos de la película y los de la superficie del sustrato. Sin embargo, la aplicación de esta técnica se encuentra limitada a los rangos de temperaturas de recristalización de los aceros. Otro método consiste en calentar el sustrato dentro de una atmósfera de gas mientras se le aplica un potencial eléctrico negativo, convirtiéndolo en un colector de iones generados por una fuente externa, o bien haciendo que el propio sustrato sea el cátodo de una descarga luminiscente (un tipo de plasma). Así, se establece un flujo de iones con una temperatura significativamente superior a la que se puede alcanzar calentando directamente el sustrato, estimulando la difusión de los iones hacia la superficie de la muestra. Sin embargo, la energía de los iones está limitada por los parámetros de la descarga luminiscente o por las condiciones de ruptura dieléctrica del gas, por lo que, generalmente, no se pueden superar los 1000 eV [16].

Para superar las restricciones térmicas y energéticas impuestas por las temperaturas de recristalización y las descargas luminiscentes, una alternativa es emplear una fuente de iones de alta energía (superior a 50 keV) haciendo incidir un haz de iones de estas características sobre una fina capa del material de revestimiento pulverizado colocado previamente sobre la superficie del sustrato. Esto provoca que los átomos del material de revestimiento y los de la superficie del sustrato se mezclen más fácilmente y formen una interfaz extendida que

constituye una zona de transición entre los elementos que la componen. De este modo, las técnicas que emplean fuentes de haces de iones presentan una gran ventaja sobre las técnicas basadas en el calentamiento directo del sustrato o en descargas luminiscentes, pues son más efectivas en el proceso de deposición de películas delgadas, ya que permiten una mejor integración entre el sustrato y el material de revestimiento al crear una interfaz en la que hay una transición escalonada de un material a otro, lo cual es particularmente importante para revestimientos duros, pues las propiedades mecánicas de la película endurecedora son muy diferentes de las del sustrato y de nada sirve la obtención de un excelente revestimiento si se desprende con facilidad de la superficie que se pretende proteger [16].

De este modo, la composición energética del flujo de iones que incide sobre el sustrato es el factor determinante en la calidad del recubrimiento y su adhesión al mismo. Por esta razón, resulta de capital importancia conocer el espectro energético de este flujo incidente; es decir, la distribución de las energías de los iones del haz generado por la fuente, ya que puede incluir tanto energías muy bajas como energías muy altas que no estén previstas para componer el espectro energético del haz [16]. En consecuencia, con el objetivo de caracterizar haces de iones por medio de su función de distribución de energía iónica, se desarrolla una solución sencilla para la obtención remota de datos de las magnitudes físicas de interés en estos procesos de caracterización de haces de iones.

CAPÍTULO 1

Haces de iones

El enfoque experimental de este trabajo se centra en la caracterización de haces de iones, los cuales tienen una gran variedad de aplicaciones no solo en el campo de la investigación científica, sino también en la medicina, para el tratamiento de enfermedades como el cáncer, y en la industria, para la modificación de materiales, el tratamiento de superficies y el dopaje de semiconductores [18]. En el contexto de este trabajo, la caracterización de haces de iones se realiza como parte de investigaciones sobre el uso de estos haces para la elaboración de películas ultrafinas sobre superficies metálicas, con el objetivo de mejorar su dureza y su resistencia a la corrosión.

Un haz de iones es un flujo de partículas de estas especies, cuyos vectores de desplazamiento son casi paralelos entre sí (no así sus trayectorias); es decir, es un flujo dirigido (las partículas están focalizadas), y presentan una baja dispersión en la distribución de energías cinéticas de traslación [12]. Idealmente, este haz posee simetría cilíndrica, lo que significa que las partículas, en su conjunto, describen una trayectoria rectilínea, como se muestra en la figura 1.1. En consecuencia, es indispensable definir algunos conceptos propios de la dinámica de un haz de partículas cargadas a fin de poder caracterizarlos, con el objetivo de determinar el haz de iones más adecuado para una aplicación según sus requerimientos.

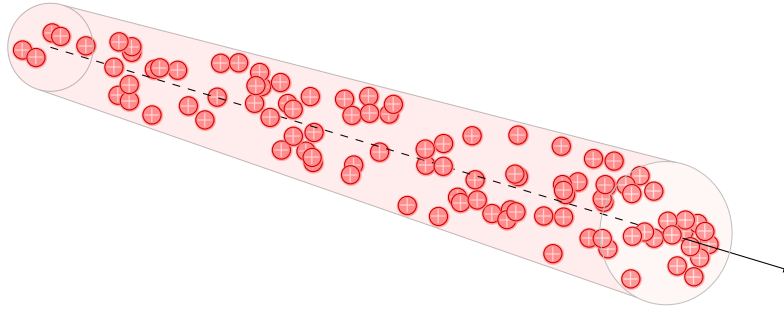


Figura 1.1. Representación de un haz de iones con geometría cilíndrica propagándose longitudinalmente a lo largo del eje z .

1.1. Carga espacial

Los iones de un haz experimentan fuerzas repulsivas entre sí como resultado de las interacciones de naturaleza electrostática, gobernadas por la ley de Coulomb, mientras que, debido a las interacciones por medio de los campos magnéticos generados por el movimiento de los iones, estos podrían experimentar fuerzas atractivas o repulsivas entre sí, dependiendo de sus movimientos relativos (figura 1.2). En la mayoría de experimentos, las fuerzas repulsivas de origen electrostático predominan sobre las fuerzas magnéticas asociadas a las corrientes eléctricas que el movimiento relativo de los iones constituyen, por lo que el efecto combinado de estas interacciones resulta en la dispersión del haz en las direcciones perpendiculares a la dirección de propagación del haz; es decir, transversal a la dirección del haz, dando como resultado una configuración de cargas en el espacio en el que estas se propagan denominada carga espacial. La figura 1.3 ilustra este fenómeno.

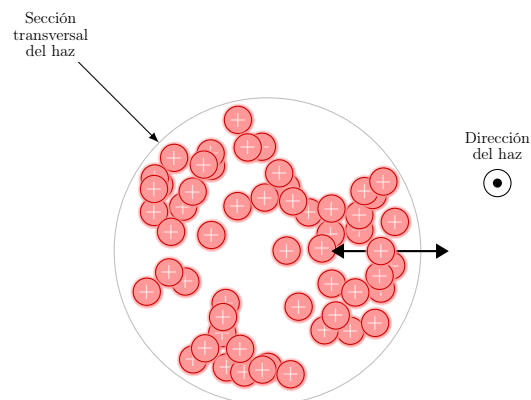


Figura 1.2. Fuerzas netas de repulsión y de atracción sobre un ion del haz (basada en la figura 2 de *Space-Charge Effects*, de N. Chauvin, en *Ion Sources*, pp. 63-83, de R. Bailey).

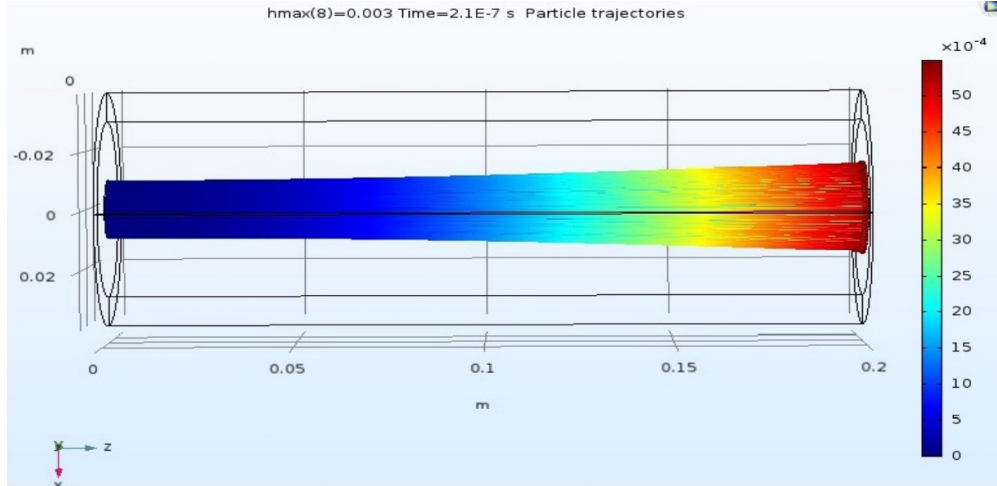


Figura 1.3. Dispersión del haz a medida que avanza en el tiempo y el espacio (tomada de la figura 8 de Hernández, A., Maury, G. H. I., y García, M. C., *Diseño y construcción de una fuente de iones por medio de un reactor de plasma* [9]).

1.2. Espacio de fases

El estado de una partícula clásica está completamente determinado por su posición \mathbf{r} y su velocidad \mathbf{v} . El estado de un sistema de muchas partículas corresponde a una determinada distribución de puntos (\mathbf{r}, \mathbf{v}) en el *espacio de fases*, espacio en el que se encuentran todos los posibles estados dinámicos (o fases) del sistema. Los conceptos que se presentan en esta sección y en las secciones 1.3 y 1.4 siguen el desarrollo teórico presentado en el capítulo 2 de *Introduction to Plasma Physics. C17 Lecture Notes*, de John Howard [11].

Considere una partícula de la especie α . Su dinámica se describe por un vector de posición

$$\mathbf{r} = x\hat{\mathbf{i}} + y\hat{\mathbf{j}} + z\hat{\mathbf{k}}$$

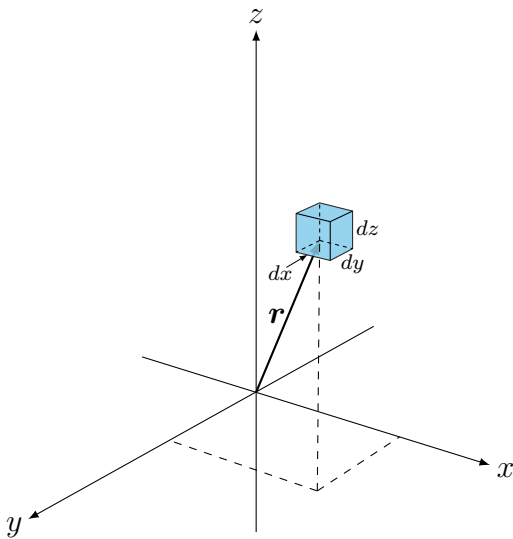
en el *espacio de configuración* y por un vector de velocidad

$$\mathbf{v} = v_x\hat{\mathbf{i}} + v_y\hat{\mathbf{j}} + v_z\hat{\mathbf{k}}$$

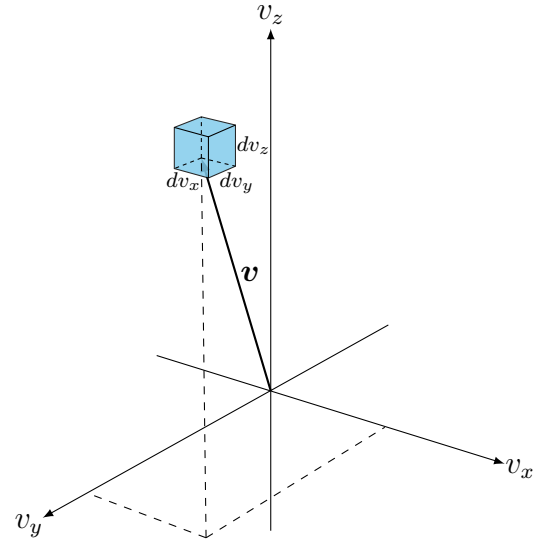
en el *espacio de velocidad*. Las coordenadas (\mathbf{r}, \mathbf{v}) definen la *posición de la partícula en el espacio de fases*. Para un sistema de muchas partículas, se introduce el concepto de función de distribución $f_\alpha(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)$ de la especie α tal que

$$f_\alpha(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)d\mathbf{r}d\mathbf{v} = dN(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) \quad (1.1)$$

es el número de partículas en el elemento de volumen $dV = d\mathbf{r}d\mathbf{v}$ ubicado en la posición (\mathbf{r}, \mathbf{v}) en el instante t en el espacio de fases. Aquí, $d\mathbf{r} \equiv d^3r \equiv dx dy dz$ y $d\mathbf{v} \equiv d^3v \equiv dv_x dv_y dv_z$. Es importante mencionar que, por definición, $f_\alpha(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)$ es una función positiva finita y decrece a cero a medida que $v = |\mathbf{v}|$ aumenta.



(a) Elemento de volumen $d\mathbf{r} = dx dy dz$ en la posición \mathbf{r} en el espacio de configuración.



(b) Elemento de volumen $d\mathbf{v} = dv_x dv_y dv_z$ en la posición \mathbf{v} en el espacio de velocidad.

Figura 1.4. Los elementos de volumen de los espacios de configuración y de velocidad juntos constituyen un elemento de volumen $dV = d\mathbf{r}d\mathbf{v}$ en la posición (\mathbf{r}, \mathbf{v}) en el espacio de fases (basada en la figura 2.1 de *Introduction to Plasma Physics. C17 Lecture Notes*, de John Howard).

La integral de f_α sobre todo el espacio de velocidad representa la densidad numérica de partículas de la especie α

$$n_\alpha = \int_{\mathbb{R}^3} f_\alpha(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) d\mathbf{v} \quad (1.2)$$

Multiplicando la ecuación (1.2) por la masa m_α o la carga q_α se obtiene la densidad de masa $\rho_{m\alpha}$ o la densidad de carga eléctrica $\rho_{q\alpha}$ de la especie α , respectivamente

$$\rho_{m\alpha} = m_\alpha \int_{\mathbb{R}^3} f_\alpha(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) d\mathbf{v} \quad (1.3)$$

$$\rho_{q\alpha} = q_\alpha \int_{\mathbb{R}^3} f_\alpha(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) d\mathbf{v} \quad (1.4)$$

En lo sucesivo y por simplicidad, se omite el subíndice α para el análisis. La cantidad

$$\hat{f}(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) = \frac{f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)}{\int_{\mathbb{R}^3} f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) d\mathbf{v}}$$

es la probabilidad de encontrar una partícula en un volumen unitario en el espacio físico (espacio de configuración) centrado en \mathbf{r} y en un volumen unitario en el espacio de velocidad centrado en \mathbf{v} en el instante t ; y, por la ecuación (1.2), se tiene que

$$\hat{f}(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) = \frac{f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)}{n(\mathbf{r}, t)} \quad (1.5)$$

Así, la velocidad promedio de las partículas del sistema es

$$\bar{\mathbf{v}}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{n(\mathbf{r}, t)} \int_{\mathbb{R}^3} \mathbf{v} f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) d\mathbf{v} \quad (1.6)$$

En un haz, los iones se desplazan en conjunto en una dirección preferencial con una velocidad promedio no nula denominada *velocidad de deriva*; sin embargo, esto no significa que todos los iones del haz se muevan en la misma dirección. Así, se define la *velocidad térmica* (o aleatoria) de los iones \mathbf{v}_r como

$$\mathbf{v}_r = \mathbf{v} - \bar{\mathbf{v}}$$

la cual representa la parte de la velocidad de cada partícula que difiere de la media; es decir, la desviación individual de la velocidad de cada partícula respecto a la velocidad del movimiento colectivo de los iones [3], [4]. Así, la velocidad de las partículas puede expresarse en términos de la velocidad de deriva asociada al movimiento colectivo «ordenado» de los iones y de la velocidad térmica asociada al movimiento aleatorio de los iones del haz:

$$\mathbf{v} = \bar{\mathbf{v}} + \mathbf{v}_r \quad (1.7)$$

1.3. Flujo de partículas

Al multiplicar la velocidad promedio por la densidad numérica de partículas se obtiene el flujo de partículas.

$$\begin{aligned}
 \Gamma &= \int_{\mathbb{R}^3} f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) d\mathbf{v} \cdot \frac{1}{n(\mathbf{r}, t)} \int_{\mathbb{R}^3} \mathbf{v} f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) d\mathbf{v} \\
 &= n(\mathbf{r}, t) \cdot \frac{1}{n(\mathbf{r}, t)} \int_{\mathbb{R}^3} \mathbf{v} f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) d\mathbf{v} \\
 &= \int_{\mathbb{R}^3} \mathbf{v} f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) d\mathbf{v} \\
 &= n(\mathbf{r}, t) \bar{\mathbf{v}}(\mathbf{r}, t) \quad (\text{por la ecuación (1.6)})
 \end{aligned}$$

luego

$$\mathbf{\Gamma} = n\bar{\mathbf{v}} \quad (1.8)$$

El flujo de partículas representa la cantidad de partículas que atraviesan una sección transversal a la dirección de su movimiento colectivo (la dirección del haz) cada segundo y tiene unidades de $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

1.4. Densidad e intensidad de corriente eléctricas

Al multiplicar la velocidad promedio por la densidad de carga eléctrica se obtiene la densidad de corriente eléctrica (en este caso, densidad de corriente iónica)

$$\begin{aligned}
 \mathbf{J} &= qn\bar{\mathbf{v}} \\
 &= q\mathbf{\Gamma}
 \end{aligned}$$

luego

$$\mathbf{J} = q\mathbf{\Gamma} \quad (1.9)$$

La intensidad de corriente iónica (la intensidad de corriente del haz) es

$$I = \int \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} \quad (1.10)$$

Dado que la dirección en la que se desplazan los iones es paralela a la normal de la sección transversal del haz, se tiene que

$$I = J \cdot S \quad (1.11)$$

donde $J = |\mathbf{J}|$ y S es el área de la sección transversal del haz.

1.5. Ley de Child-Langmuir

La ley de Child-Langmuir establece la densidad de corriente eléctrica máxima de un flujo de partículas cargadas a través de una brecha de extracción¹ unidimensional. Este límite surge de los campos eléctricos longitudinales de la carga espacial del haz. Para un sistema de extracción práctico de dos electrodos en el vacío, es necesario realizar cálculos tridimensionales, incluyendo factores de forma que dependen de la geometría de los electrodos de extracción [5]. La ley de Child-Langmuir para aperturas circulares se expresa como

$$J = \frac{4\epsilon_0}{9d^2} \sqrt{\frac{2q}{m}} V^{3/2} \quad (1.12)$$

donde ϵ_0 es la permitividad del vacío, d es la distancia entre los electrodos de emisión y aceleración; y q y m son la carga eléctrica y la masa de los iones, respectivamente. Multiplicando la ecuación (1.12) por $S = \pi a^2$, el área de la apertura circular de extracción de radio a , se obtiene la intensidad de corriente máxima del haz que se puede obtener para una diferencia de potencial determinada [9]

$$I = \frac{4\pi\epsilon_0 a^2}{9d^2} \sqrt{\frac{2q}{m}} V^{3/2} \quad (1.13)$$

La ley de Child-Langmuir, también conocida como «ley de 3/2», se expresa comúnmente como

$$I = P V^{3/2} \quad (1.14)$$

donde $P = \frac{4\pi\epsilon_0 a^2}{9d^2} \sqrt{\frac{2q}{m}}$ es la *perveancia* del haz. Así,

$$P = \frac{I}{V^{3/2}} \quad (1.15)$$

La perveancia es una medida del efecto de la carga espacial de un haz sobre su capacidad de conducción eléctrica: a mayor perveancia, mayor es la densidad de corriente del haz y, por tanto, mayor es su intensidad de corriente para una determinada diferencia de potencial

¹La brecha de extracción es el espacio entre dos electrodos (cátodo y ánodo) desde donde se extraen las partículas cargadas; en este caso, los iones.

eléctrico. De igual forma, cuanto menor es la perveancia, menor es la densidad de corriente del haz. La única forma de aumentar la densidad de corriente de un haz es incrementando la intensidad del campo eléctrico en la brecha de extracción ya sea disminuyendo la separación cátodo-ánodo de la cámara de extracción de los iones o aumentando la diferencia de potencial eléctrico entre estos electrodos [5].

1.6. Grado de compensación

La compensación de carga espacial (SCC, por sus siglas en inglés), también denominada neutralización de carga espacial, es un proceso mediante el cual se anula parcial o totalmente el efecto repulsivo de las fuerzas de Coulomb entre los iones de un haz, introduciendo cargas de signo opuesto. para contrarrestar los campos eléctricos generados por los iones del haz, dando lugar a un efecto de enfoque. Uno de los métodos más comunes de SCC para haces de baja energía, por ejemplo, consiste en hacer pasar el haz a través de un gas. Esto induce la ionización de las moléculas del gas y los electrones producidos por esta ionización son atrapados por el potencial del haz, mientras que los iones son expulsados fuera del haz, hasta que se alcanza un estado estacionario constituyendo un «haz de plasma» [5]. Este proceso se ilustra en la figura 1.5.

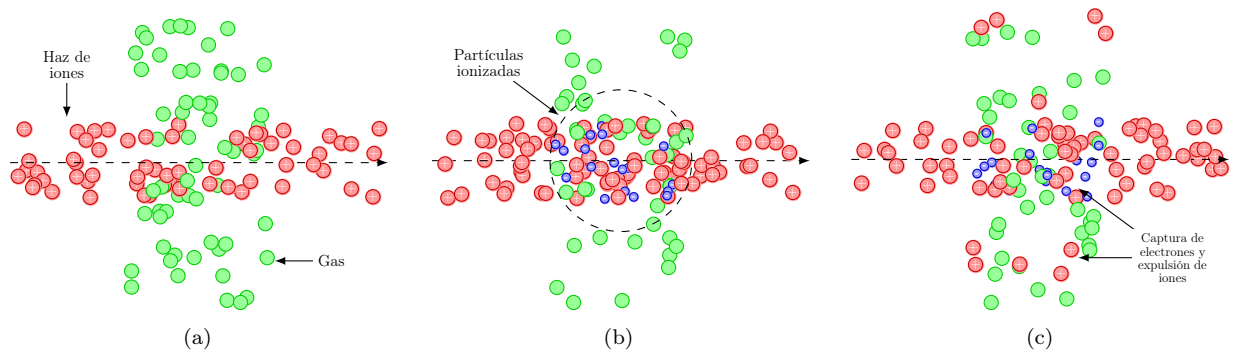


Figura 1.5. Proceso de compensación de carga espacial (basada en la figura 7 de *Space-Charge Effects*, de N. Chauvin, en *Ion Sources*, pp. 63-83, de R. Bailey).

Para ilustrar el concepto de grado de compensación, considere un haz de iones uniforme con geometría cilíndrica de radio r_h , rapidez $v = \beta c$ e intensidad de corriente I que se propaga longitudinalmente a lo largo de una cavidad cilíndrica de radio R , la cual se asume conectada a tierra (figura 1.6).

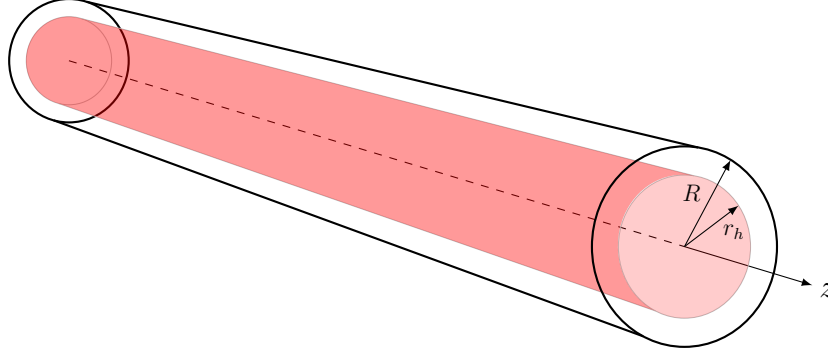


Figura 1.6. Haz de iones uniforme con geometría cilíndrica propagándose a lo largo de una cavidad cilíndrica (basada en la figura 8 de *Space-Charge Effects*, de N. Chauvin, en *Ion Sources*, pp. 63-83, de R. Bailey).

En ausencia de compensación de carga espacial, los campos eléctricos dentro y fuera del haz están dados por las ecuaciones (1.16a) y (1.16b):

$$E(r) = \frac{Ir}{2\pi\epsilon_0\beta cr_h^2} \quad \text{si } r \leq r_h \quad (1.16a)$$

$$E(r) = \frac{I}{2\pi\epsilon_0\beta cr} \quad \text{si } r > r_h \quad (1.16b)$$

Los potenciales eléctricos dentro y fuera del haz, teniendo en cuenta la condición de frontera $\phi(R) = 0$ V están dados por las ecuaciones (1.17a) y (1.17b).

$$\phi(r) = \frac{I}{4\pi\epsilon_0\beta c} \left[1 + 2 \ln \left(\frac{R}{r_h} \right) - \frac{r}{r_h^2} \right] \quad \text{si } r \leq r_h \quad (1.17a)$$

$$\phi(r) = \frac{I}{2\pi\epsilon_0\beta c} \ln \left(\frac{R}{r} \right) \quad \text{si } r_h \leq r \leq R \quad (1.17b)$$

El potencial eléctrico en el eje del haz (el «pozo de potencial») está dado por la ecuación (1.17a) para $r = 0$:

$$\phi_0 = \frac{I}{4\pi\epsilon_0\beta c} \left[1 + 2 \ln \left(\frac{R}{r_h} \right) \right] \quad (1.18)$$

Durante el proceso de SCC, los electrones que resultan del proceso de ionización del gas son atrapados por este pozo de potencial eléctrico. Si se define ϕ_c como el potencial eléctrico en el eje de un haz compensado en estado estacionario, el grado de SCC está dado por

$$\eta = 1 - \frac{\phi_c}{\phi_0} \quad (1.19)$$

Se puede notar que

- Si la compensación es total, $\phi_c = 0$ y $\eta = 1$.
- Si la compensación es parcial, $0 < \eta < 1$
- Si no hay compensación, $\phi_c = \phi_0$ y $\eta = 0$.

Así, η representa la fracción de los iones del haz que han sido neutralizados.

CAPÍTULO 2

Sonda de potencial de repulsión

Existen diferentes métodos para caracterizar un haz de iones, y la elección de uno u otro depende de la naturaleza del haz, de las limitaciones técnicas y prácticas y, principalmente, de la información específica que se desea obtener. Para comprender en qué consiste el proceso de caracterización de un haz de iones, es fundamental conocer el método aplicado, así como las magnitudes físicas medidas a fin de interpretar correctamente los datos obtenidos y los resultados derivados de su procesamiento.

El método objeto de interés en este trabajo se basa en el uso de una sonda de potencial de repulsión¹ ubicada frente al haz, con la que se aplica un barrido de potencial eléctrico positivo para discriminar de forma controlada los iones según su energía cinética y así obtener la distribución de energía iónica del haz, a partir de la medición simultánea del potencial eléctrico del electrodo con el que se controla el flujo de iones a través de este y de la intensidad de la corriente (iónica) a través de otro electrodo. Este método permite la obtención de datos tan precisos como la electrónica involucrada lo permita, lo cual hace que destaque por su practicidad. A continuación, se presenta la descripción funcional de los electrodos en el diseño de una sonda de potencial de repulsión de cinco electrodos, expuesta con detalle en la tesis de doctorado *Elaboración y estudio de recubrimientos modulados de alta adhesión por flujos plásmicos*, del investigador Fredy F. Parada [16].

¹También conocido como potencial de retardo o potencial de frenado en la literatura especializada.

2.1. Diseño representativo de una sonda de potencial de repulsión

2.1.1. Electrodo de medición

El componente principal de una sonda de potencial de repulsión es un electrodo denominado electrodo de medición o colector, y es con el cual se realiza la medición de la intensidad de la corriente iónica. Este electrodo tiene forma de disco y se posiciona dentro de la sonda de tal manera que el plano del disco sea perpendicular al haz de iones, como se muestra en la figura 2.1.

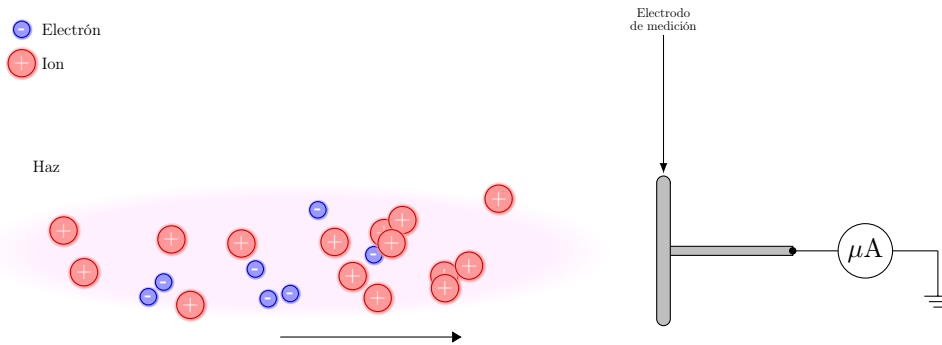


Figura 2.1. Sonda para la medición de la intensidad de corriente de un haz de iones.

La intensidad de la corriente medida está determinada por los aportes de las corrientes de las especies con carga eléctrica del haz y por un fenómeno que tiene lugar en la superficie del electrodo de medición llamado emisión secundaria de electrones². Así, la intensidad de la corriente medida se expresa como

$$i_{total} = i^{+} + i^{-} + i_{sup} \quad (2.1)$$

donde i^{+} es la componente asociada a los iones, i^{-} es la componente asociada a los electrones e i_{sup} es la componente asociada a la emisión secundaria de electrones.

Para medir la intensidad de la corriente iónica del haz, es necesario que lleguen únicamente iones al electrodo de medición, por lo que se le aplica un potencial eléctrico negativo para repeler los electrones del haz que se encuentren en las cercanías del electrodo. Sin embargo,

²La emisión secundaria de electrones es un fenómeno físico que se da cuando un material es bombardeado con partículas con carga eléctrica (electrones, protones o iones) y de alta energía en el cual algunos de los átomos de la superficie del material pueden liberar electrones debido a la interacción con las partículas incidentes [23].

como se mencionó anteriormente, el flujo de iones (algunos altamente energéticos) que impacta la superficie del electrodo de medición provoca la emisión secundaria de electrones, los cuales, a su vez, son acelerados desde la misma hacia el haz por la acción repulsiva del potencial negativo del electrodo. La cantidad de electrones de emisión secundaria y, por tanto, sus efectos sobre el haz dependen de la energía de los iones que impacten en el electrodo de medición. Con valores de potencial eléctrico relativamente bajos en magnitud (entre -25 V y -20 V), los electrones provenientes del haz son repelidos con efectividad pero, para valores de potencial mayores en magnitud para repeler electrones más energéticos con energías superiores a 500 eV , la emisión secundaria de electrones (determinada por la función de trabajo electrónico del material³) no puede despreciarse. Esto se debe a que la corriente electrónica que esta emisión constituye, acrecentada por el potencial negativo del electrodo, puede afectar de manera significativa la identidad del haz por la ionización de posibles partículas neutras presentes o por la configuración de atmósferas de carga locales, produciendo la llegada de nuevas partículas ionizadas al electrodo de medición, con el consecuente aumento del error en las medidas de la intensidad de la corriente iónica.

Por otro lado, al aplicar un potencial eléctrico positivo al electrodo de medición, se configura una barrera electrostática, esta vez para los iones, la cual es superada únicamente por aquellos cuya energía cinética es superior a la energía potencial eléctrica asociada a una pequeña región en las cercanías del electrodo. Al variar este potencial, es posible controlar el flujo de iones hacia el electrodo de medición según su energía cinética. Sin embargo, esto puede ocasionar que los electrones presentes en el espacio colindante con el electrodo se aceleren hacia este, introduciendo errores en las medidas de la intensidad de la corriente iónica. Obviamente, es imposible implementar ambas estrategias para controlar el flujo de especies con carga eléctrica al mismo tiempo con el mismo electrodo, por lo que se hace necesario implementar un segundo electrodo que se encargue exclusivamente de repeler los electrones.

2.1.2. Electrodo de repulsión

Frente al electrodo de medición se ubica un segundo electrodo con forma circular cuya superficie configura una retícula cuadrada⁴, denominado electrodo de repulsión, al cual se le aplica un potencial eléctrico negativo $-v_R$ ajustable. Este electrodo configura una barrera electrostática que impide el paso de electrones (cuya energía es relativamente baja) a través de este, así como la emisión secundaria de electrones desde la superficie del electrodo de

³La función de trabajo electrónico de un material es la energía (o trabajo) requerida para retirar completamente un electrón de una superficie metálica [7]

⁴Debido a su geometría, este tipo de electrodo se denomina electrodo ranurado o de rejilla.

medición, pero permite la llegada de iones a este último gracias a su diseño en forma de rejilla, como se muestra en la figura 2.2.

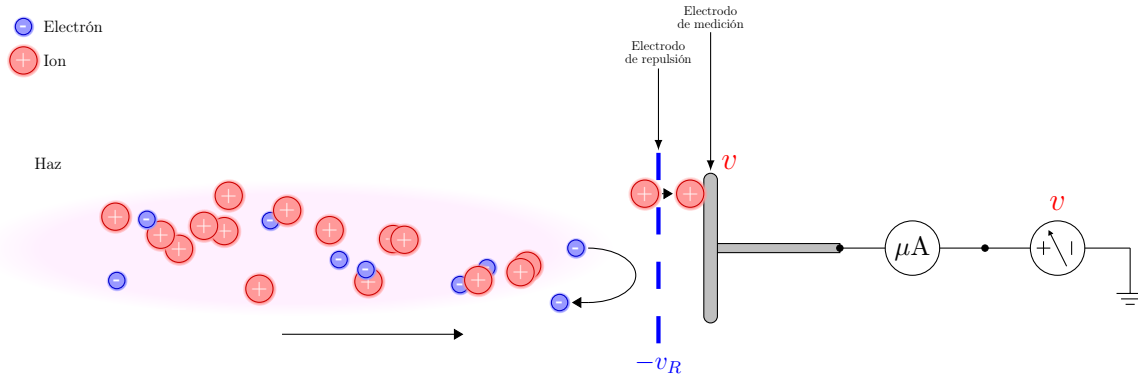


Figura 2.2. Sonda con electrodo de repulsión de electrones y una fuente de tensión CD variable conectada al electrodo de medición para controlar el flujo de iones.

Es importante mencionar que, para que el electrodo de repulsión cumpla su función eficazmente, este debe generar un campo eléctrico uniforme en sus cercanías, por lo que debe garantizarse que las dimensiones L de las aberturas cuadradas de la retícula sean menores que el doble de la longitud de Debye ($L < 2\lambda_D$) [24].

El propósito y funcionamiento del electrodo de repulsión es exactamente igual al del electrodo de medición en el diseño más simple de la sonda (constituida únicamente por el electrodo de medición), por lo que presenta, entre otros inconvenientes, los mismos descritos anteriormente en la estrategia de usar al electrodo de medición para repeler los electrones; a saber, la emisión secundaria de electrones desde la superficie de este electrodo a causa del impacto de iones altamente energéticos sobre la estructura reticulada y sus efectos sobre el haz intensificados por el potencial negativo del electrodo, lo que hace necesario implementar un electrodo adicional para superar estos inconvenientes.

2.1.3. Electrodo de apantallamiento

Al ubicar un tercer electrodo frente al electrodo de repulsión con un potencial eléctrico igual al del haz (un potencial eléctrico «flotante»), es posible evitar la propagación de perturbaciones hacia el haz y disminuir la probabilidad de que lleguen electrones al electrodo de medición sin recurrir a interacciones eléctricas; esto es, actuando simplemente como una barrera física. Este electrodo se denomina electrodo de apantallamiento (o de blindaje) y, en montajes experimentales, está conectado directamente a tierra (0 V) debido a que, por lo general, el potencial del haz es muy cercano al potencial de tierra. Para obtener una

ventaja adicional, este electrodo se conecta a la estructura externa de la sonda para configurar una superficie equipotencial⁵ que constituya lo que se conoce como una «jaula de Faraday», impidiendo la propagación de perturbaciones en el haz ocasionadas por los campos eléctricos de los electrodos de repulsión y de medición. El esquema se muestra en la figura 2.3.

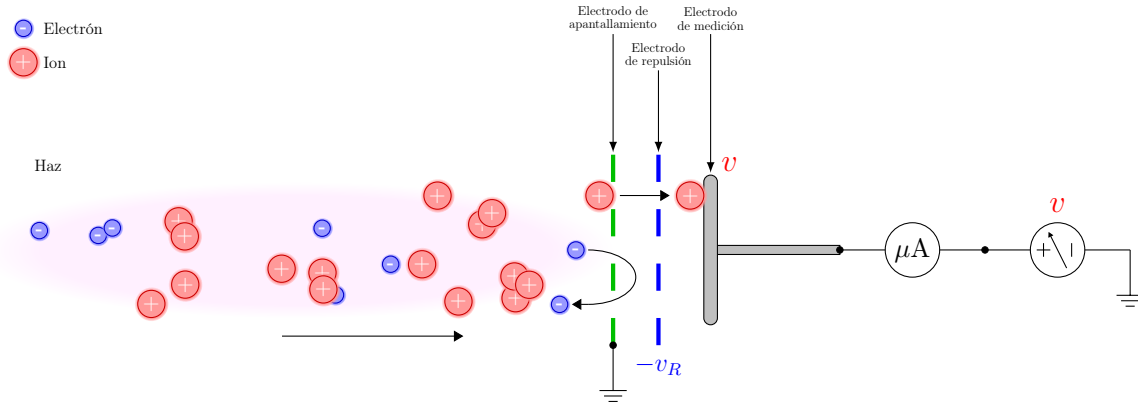


Figura 2.3. Sonda con electrodo de apantallamiento para evitar la propagación de perturbaciones sobre el haz ocasionadas por el electrodo de repulsión.

2.1.4. Electrodo de análisis

Debido a que la fuente de alimentación es un sistema electrónico con capacidad para suministrar energía en el orden de varios kiloelectronvolts y posee una resistencia interna relativamente alta, puede generar altos niveles de ruido, lo que introduce errores significativos en las medidas de la intensidad de la corriente iónica. Un diseño mejorado de la sonda emplea dos electrodos para realizar el control del potencial de repulsión y la medición de la intensidad de la corriente iónica de forma independiente. El electrodo de medición mantiene su función original: la medición de la intensidad de la corriente iónica, mientras que para el control del potencial de repulsión se implementa un electrodo adicional denominado electrodo de análisis, también de tipo rejilla, el cual se ubica frente al electrodo de medición, como se muestra en la figura 2.4.

⁵El potencial de 0 V que adquiere el electrodo de apantallamiento se debe a que es la estructura externa de la sonda, a la cual está ensamblado, la que está inicialmente aterrizada.

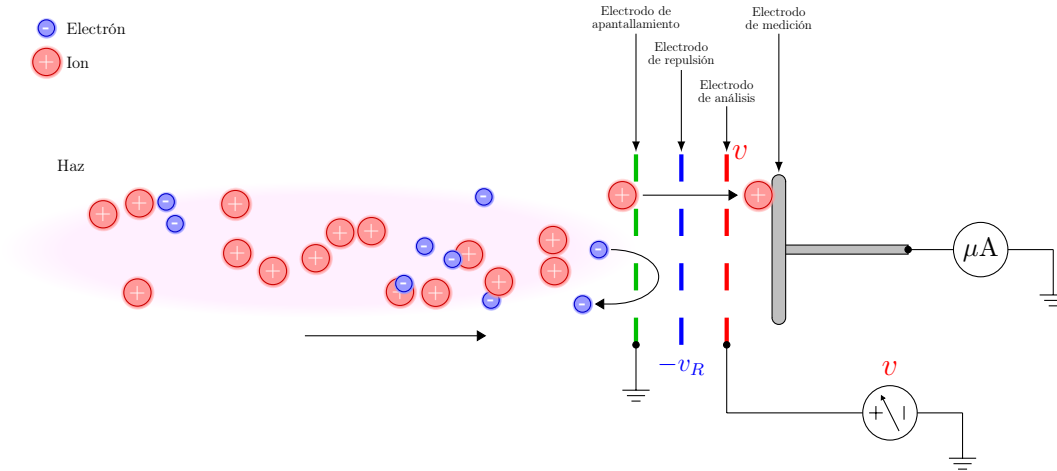


Figura 2.4. Sonda con electrodo independiente para el control del potencial de repulsión.

2.1.5. Electrodo de supresión

En esta configuración, el electrodo de repulsión ya no impide la emisión secundaria de electrones desde la superficie del electrodo de medición, por lo que se hace necesario implementar un último electrodo con características similares a los demás con un potencial eléctrico negativo, ubicado frente al electrodo de medición con el fin de evitar dicha emisión secundaria y así eliminar el aporte de la corriente electrónica al circuito de medición de la corriente iónica. Este electrodo se denomina electrodo de supresión. El esquema final de la sonda se muestra en la figura 2.5.

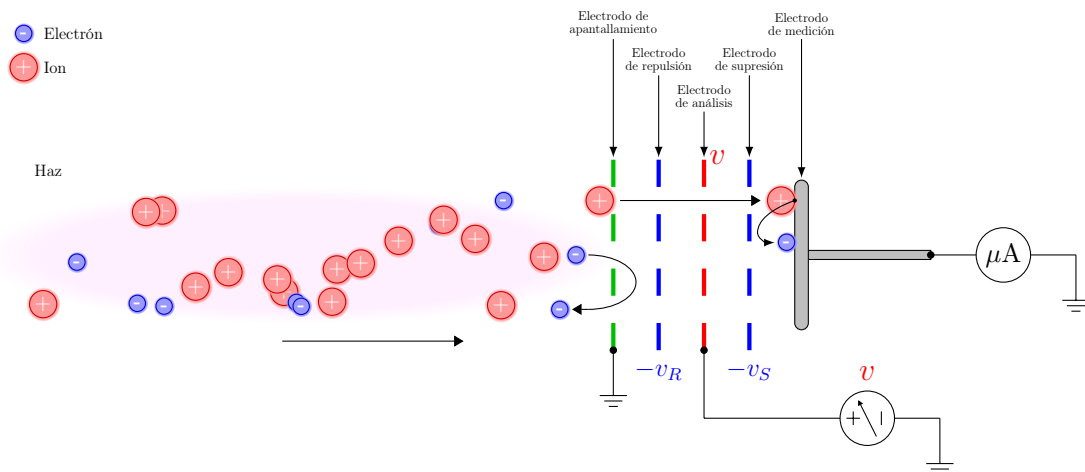


Figura 2.5. Sonda con electrodo de supresión para evitar la emisión secundaria desde la superficie del electrodo de medición.

2.1.6. Variante de la sonda con trampa magnética para electrones

La composición química introduce una dimensión en la variedad de plasmas que se pueden observar en la naturaleza o producir artificialmente. En algunos procesos de caracterización de haces de iones, como el llevado a cabo por el investigador Fredy F. Parada para medir la energía de los iones en un flujo de vapor metálico, el electrodo de repulsión de la sonda representa un inconveniente. Como se indicó en la sección 2.1.1 de este capítulo, el campo eléctrico generado para repeler los electrones puede modificar la distribución de especies en el haz, afectando la identidad del mismo. Este fenómeno es particularmente problemático en haces de iones metálicos pues, los electrones repelidos por el potencial eléctrico negativo del electrodo de repulsión, al ser acelerados hacia el haz, pueden ionizar los átomos metálicos entrantes a la sonda debido a que su potencial de ionización está entre 6 eV y 8 eV, que es significativamente inferior al potencial de ionización de los átomo del gas, el cual se encuentra entre 10 eV y 15 eV, valores para los cuales ha sido ajustado el potencial del electrodo repulsión. Adicionalmente, los electrones más energéticos podrían atravesar esta barrera electrostática sin problema, alterando las mediciones de la corriente iónica a través del colector. Por esta razón se propuso experimentar (con éxito) con un sistema magnético que sustituyera al electrodo de repulsión, el cual consiste en dos imanes cilíndricos de 5 mm de diámetro que generan un campo magnético perpendicular al flujo de electrones entrante y en el cual quedan «atrapados». Para que este sistema sea efectivo, es necesario tener en cuenta el radio de Larmor específico para cada experimento ($r_L = \frac{1}{eB} \sqrt{2m_e E_{ce}}$). La figura 2.6 muestra el diagrama de esta variante de la sonda.

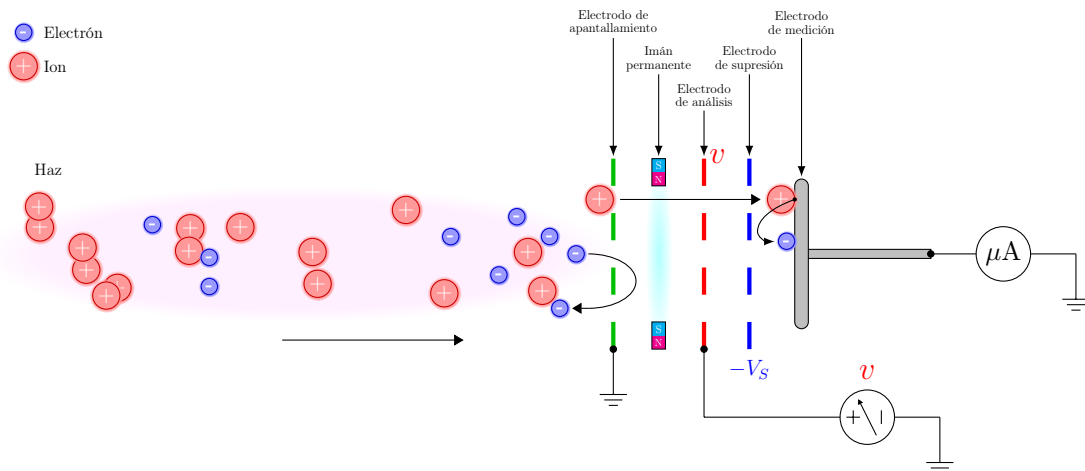


Figura 2.6. Variante de la sonda con trampa magnética para electrones.

En la figura 2.7 se muestran fotografías de la sonda con la que se cuenta en el Laboratorio de Física de Plasma de la Universidad Industrial de Santander para las investigaciones realizadas por el Grupo de Investigación en Física y Tecnología del Plasma y Corrosión, FITEK. Esta es una sonda de potencial de repulsión de tres electrodos: electrodo de medición, electrodo de repulsión y electrodo de apantallamiento.



(a) Diseño típico. Se observa la rejilla utilizada para emplear el potencial de repulsión.



(b) Variante de la sonda. Se observa la configuración de imanes para crear la trampa magnética para los electrones.

Figura 2.7. Vista interna de la sonda de potencial de repulsión del Laboratorio de Física de Plasma de la Universidad Industrial de Santander (tomada de la figura H.7 de la tesis de doctorado *Elaboración y estudio de recubrimientos modulados de alta adhesión por flujos plásmicos*, del investigador Fredy Fabián Parada Becerra).

2.2. Característica de potencial de repulsión

Según lo expuesto en la sección 9.3 de *Industrial Ion Sources. Broadbeam Gridless Ion Source Technology*, de Viacheslav V. Zhurin [24], la intensidad de la corriente iónica $i = i^+$ del haz a través del electrodo de medición depende del potencial eléctrico v , el potencial de repulsión, en las proximidades de este (establecido por el potencial de análisis); esto es,

$$i = g(v) \quad (2.2)$$

Esta relación de dependencia se denomina *característica de potencial de repulsión*. Cuando el potencial de repulsión es de 0 V, todos los iones del haz llegan hasta electrodo de medición, por lo que $i(0) = i_{\text{máx}}$. A medida que el potencial de repulsión aumenta, disminuye la intensidad de la corriente iónica hasta que, eventualmente, se hace nula; es decir, $i(v_{\text{máx}}) = i_{\text{mín}} = 0$ A. Expresando i en función de la energía potencial eléctrica E (en eV) y normalizando al rango $[0, 1]$, se obtiene la *característica de potencial de repulsión normalizada*

$$\hat{i}(E) = \frac{i(E)}{i_{\text{máx}}} \quad (2.3)$$

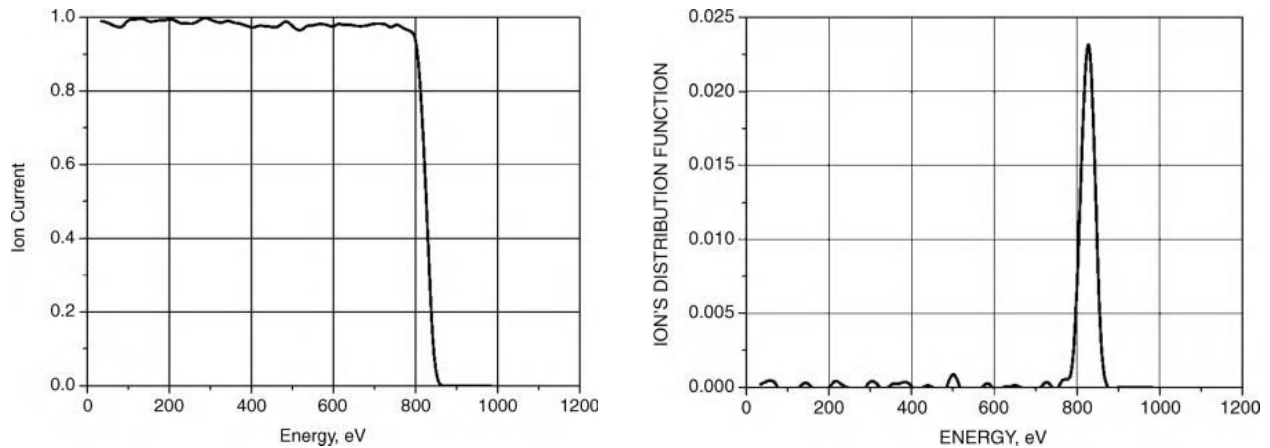
Los iones cuya energía cinética de traslación E_c es menor que la energía potencial eléctrica $E_p = E$ asociada a los puntos de la región en las cercanías del electrodo de análisis no pueden llegar al colector, configurándose una barrera energética que es superada únicamente por aquellos iones para los cuales $E_c > E$. Con base en lo anterior, se definen la *función integral de distribución de energía iónica*⁶

$$F(E) := 1 - \hat{i}(E) \quad (2.4)$$

y la *función de distribución de energía iónica*⁷ (IEDF, por sus siglas en inglés)

$$f(E) := -\frac{d}{dE}\hat{i}(E) \quad (2.5)$$

Las figuras 2.8 y 2.9 muestran las características de potencial de repulsión normalizadas y sus correspondientes funciones de distribución de energía iónica de dos procesos de caracterización de haces de iones.



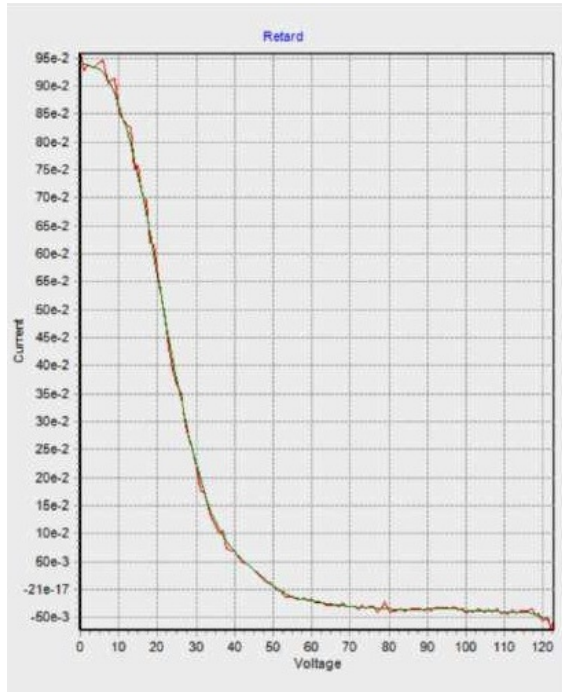
(a) Curva de potencial de retardo normalizada para la fuente de iones con rejilla. Gas de trabajo: argón; tensión de aceleración: $V_a = 850$ V.

(b) Distribución de energía del haz de iones para la fuente de iones con rejilla. Gas de trabajo: argón; tensión de aceleración: $V_a = 850$ V.

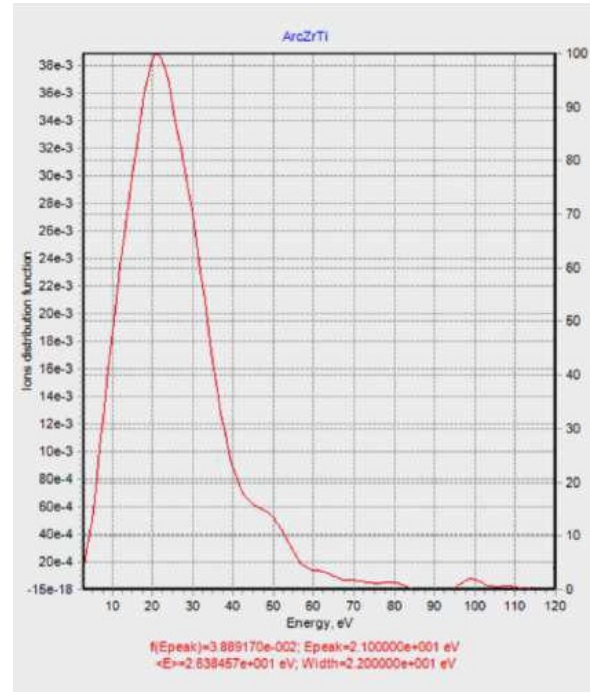
Figura 2.8. Curva de potencial de retardo normalizada y distribución de energía para un haz de iones generado por una fuente de iones electrostática con rejilla (tomadas de la figura 9.12 de *Industrial Ion Sources. Broadbeam Gridless Ion Source Technology*, de Viacheslav V. Zhurin).

⁶La ecuación (2.4) se denomina integral porque representa la fracción de iones que poseen una energía cinética menor o igual a E_p , por lo que $F(E)$ representa una función de distribución acumulativa.

⁷Aunque se denomina función de distribución, $f(E)$ es, por definición, una función de densidad de probabilidad, por lo que también se conoce como función de densidad de energía iónica o función de densidad energética iónica.



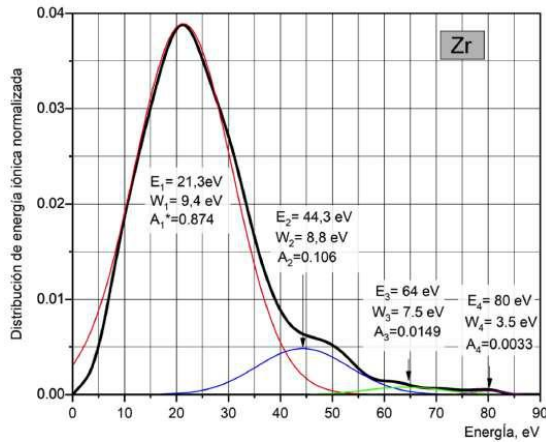
(a) Característica de potencial de repulsión normalizada.



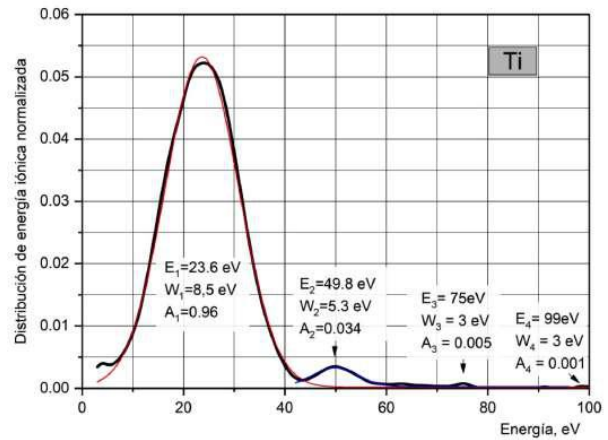
(b) Distribución de energía iónica.

Figura 2.9. Ejemplo del procesamiento de la señal característica de potencial de repulsión para la obtención de la IEDF con el software ProbeDAM (tomadas de la figura 2.13 de la tesis de doctorado *Elaboración y estudio de recubrimientos modulados de alta adhesión por flujos plásmicos*, del investigador Fredy F. Parada).

Note que los puntos de inflexión de la característica de potencial de repulsión corresponden a los máximos locales de la función de distribución de energía iónica, los cuales se deben a la presencia de iones de segundo, tercer e incluso cuarto grado de ionización (estados de carga +2, +3 y +4, respectivamente). Teniendo en cuenta estos puntos, se puede aproximar una distribución de energía iónica determinada experimentalmente como la que se muestra en la figura 2.9b por medio de una combinación lineal de curvas gaussianas (campanas de Gauss) para así estimar la fracción del total de iones que representa cada una de las especies iónicas; es decir, la concentración de iones con primer grado de ionización y de cada tipo de iones multicargados. En la figura 2.10 se muestran las distribuciones de energía iónica de flujos de vapor de circonio y titanio. En cada caso, se identifican cuatro zonas de realce, las cuales corresponden a iones con diferentes grados de ionización (+1 a +4).



(a) Distribución de energía iónica del flujo de vapor de circonio obtenida a partir de más de 150 destellos. La aproximación con curvas gaussianas permite estimar las concentraciones relativas de cada estado de ionización, siendo un 87,4 % de iones con $Z = +1$ (gaussiana roja), 10,6 % de iones con $Z = +2$ (gaussiana azul), 1,49 % de iones con $Z = +3$ (gaussiana verde) y 0,33 % de iones con $Z = +4$ (gaussiana morada).



(b) Distribución de energía iónica del flujo de vapor de titanio obtenida a partir de más de 150 destellos. La aproximación con curvas gaussianas permite estimar las concentraciones relativas de cada estado de ionización, siendo un 96 % de iones con $Z = +1$ (gaussiana roja), 3,4 % de iones con $Z = +2$ (gaussiana azul), 0,5 % de iones con $Z = +3$ (gaussiana verde) y 0,1 % de iones con $Z = +4$ (gaussiana morada).

Figura 2.10. Espectros iónicos de flujos de vapor generados por cátodos de circonio y titanio (tomadas de las figuras 2.15 y 2.16 de la tesis de doctorado *Elaboración y estudio de recubrimientos modulados de alta adhesión por flujos plásmicos*, del investigador Fredy F. Parada).

CAPÍTULO 3

Sistema de transmisión inalámbrica de datos

El objetivo general de este trabajo es la construcción de un prototipo funcional de un sistema básico de transmisión de datos a través de un canal de radiofrecuencia en la banda ISM, desde una placa de desarrollo¹ hasta un computador personal, conectados mediante Bluetooth®. Los datos corresponden a lecturas analógicas de señales de tensión asociadas a señales analógicas de potencial de repulsión e intensidad de corriente iónica, los cuales son adquiridos por la misma placa de desarrollo mediante sus pines analógicos a través de su ADC (*Analog-to-Digital Converter*). El control del proceso de adquisición y transmisión de los datos, así como su visualización en tiempo real, se realiza a través de una interfaz gráfica de usuario (GUI, por sus siglas en inglés) desarrollada específicamente para este trabajo. En la siguiente sección se presenta una descripción general de las principales tecnologías, tanto de hardware como de software, que constituyen el Sistema de Transmisión Inalámbrica de Datos.

3.1. Tecnologías empleadas

El Sistema de Transmisión Inalámbrica de Datos se compone, principalmente, de tres tecnologías: Arduino®, para el desarrollo del hardware de adquisición y transmisión de los datos y una primera etapa de procesamiento; Bluetooth®, para la transmisión inalámbrica de la información; y MATLAB®, para el desarrollo del software de recepción y representación gráfica

¹El término «placa de desarrollo» hace referencia a placas diseñadas para la creación de proyectos electrónicos, prototipos o sistemas embebidos, como las placas Raspberry Pi™, ESP32® o las placas del ecosistema Arduino®.

de los datos. La elección de estas tecnologías tiene como propósito interactuar directamente con los componentes individuales del sistema con el objetivo de comprender, de manera general, cada una de las fases de su funcionamiento: adquisición, procesamiento, transmisión y representación visual de los datos. Además, estas tecnologías cuentan con una gran cantidad de documentación y recursos que cubren todos los niveles de complejidad, desde lo fundamental hasta lo altamente especializado.

3.1.1. Arduino®

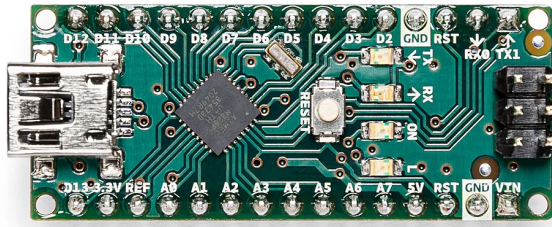
Arduino® es un ecosistema que integra hardware libre² y software de código abierto y extensible³. Está constituido, principalmente, por una amplia variedad de placas electrónicas diseñadas para diversos propósitos y necesidades, un lenguaje informático y una aplicación de escritorio que facilita el trabajo de desarrollo de los proyectos electrónicos; además de documentación, librerías y una gigantesca comunidad de desarrolladores [1].

Las placas electrónicas Arduino⁴ son plataformas de desarrollo de proyectos electrónicos que consisten en una PCB que incorpora, esencialmente, un microcontrolador reprogramable y un conjunto de terminales de conexión, comúnmente denominados pines, que corresponden físicamente a los contactos metálicos de conectores macho o hembra, dependiendo de la placa, soldados sobre la PCB, los cuales permiten realizar conexiones eléctricas entre el microcontrolador y toda clase de componentes electrónicos externos, como sensores, actuadores, pulsadores, módulos, LED, displays, etc. [6]. Estos pines se clasifican en pines digitales y pines analógicos. Los pines digitales pueden configurarse como entradas o salidas digitales (lógicas), y algunos de estos tienen la capacidad para generar señales pseudoanalógicas (pines con capacidad PWM) [17]. Los pines analógicos, por su parte, están diseñados específicamente para funcionar como entradas analógicas, aunque también pueden configurarse como entradas digitales. La figura 3.1 muestra una placa Arduino Nano.

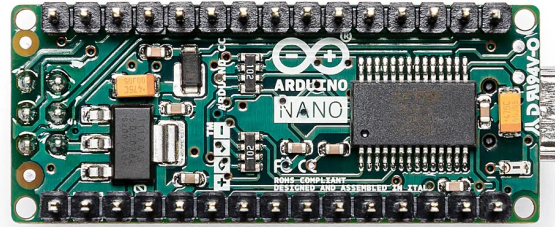
²Hardware cuyo esquema electrónico y especificaciones son de acceso público, lo que permite estudiarlo, modificarlo y distribuirlo con modificaciones.

³Software cuyo código fuente es de acceso público, lo que, al igual que el hardware libre, permite estudiarlo, modificarlo y distribuirlo con modificaciones.

⁴En adelante, y con el fin de simplificar la escritura, se omite el símbolo ®, aunque se reconoce y respeta la condición legal de marca registrada de Arduino.



(a) Vista superior.



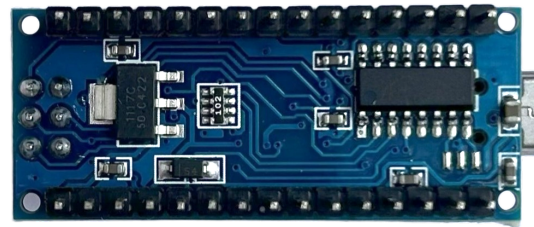
(b) Vista inferior.

Figura 3.1. Placa Arduino Nano. Fuente: Arduino Official Store.

En este proyecto se emplea una placa similar llamada NANO fabricada por un tercero, la cual incorpora el microcontrolador ATmega328P de 8 bits, al igual que la placa Arduino Nano, y tiene una configuración de hardware que la hace compatible con el ecosistema Arduino. La figura 3.2 muestra la placa NANO utilizada en este proyecto.



(a) Vista superior.



(b) Vista inferior.

Figura 3.2. Placa NANO.

El microcontrolador ATmega328P se programa a través del Entorno Integrado de Desarrollo (IDE, por sus siglas en inglés) de Arduino, el cual es un software que reúne, en una sola aplicación, todas las herramientas individuales que constituyen un entorno de desarrollo (editor de código, compilador o intérprete, depurador, librerías, entre otras) dentro de una interfaz gráfica de usuario (GUI, por sus siglas en inglés). Esto permite gestionar de manera eficiente todas las herramientas y recursos, facilita la identificación y corrección de errores, así como la organización del código, y proporciona ayudas visuales, entre muchas otras ventajas [10].

3.1.2. Bluetooth®

Bluetooth® es un conjunto de tecnologías que incluye tanto los transceptores⁵ como los protocolos de comunicación⁶. Existen dos opciones de Bluetooth®, ambas de baja potencia (ideal para este trabajo), que transmiten datos en una las bandas de frecuencias ISM⁷: la banda sin licencia conocida como banda ISM de 2,4 GHz, la cual comprende frecuencias desde 2400 MHz hasta 2483,5 MHz. Estas opciones de Bluetooth® son Bluetooth® Classic, también conocida como Bluetooth® Basic Rate/Enhanced Data Rate (BR/EDR), y Bluetooth® Low Energy (LE) [20]. En la tabla 3.1 se comparan algunas de las principales características de estas tecnologías Bluetooth®.

	Bluetooth® LE	Bluetooth® Classic
Banda de frecuencia	ISM de 2,4 GHz (utilizadas de 2,402 a 2,480 GHz)	ISM de 2,4 GHz (utilizadas de 2,402 a 2,480 GHz)
Número de canales ⁸	40 (espaciamiento ⁹ de 2 MHz, 3 canales publicitarios ¹⁰ y 37 para datos)	79 (espaciamiento de 1 MHz)
Velocidad máxima de transmisión de datos	2 Mb/s	3 Mb/s
Consumo de energía	Muy bajo	Bajo
Potencia de transmisión	-20 dBm (0,01 mW) a 20 dBm (100 mW)	-20 dBm (0,01 mW) a 20 dBm (100 mW)
Topologías de comunicación	Point-to-Point (1 a 1, e incluye piconect) Broadcast (1 a varios) Mesh (varios a varios)	Point-to-Point (1 a 1, e incluye piconect)

Tabla 3.1. Características principales de las tecnologías Bluetooth® (Fuente: Bluetooth® Technology Website).

⁵Un transceptor es un dispositivo electrónico compuesto por un transmisor y un receptor.

⁶Un protocolo de comunicación define el formato y el orden de los mensajes intercambiados entre dos o más entidades que se comunican, así como las acciones tomadas durante el proceso de transmisión o recepción de un mensaje, o en caso de ocurrencia de algún evento [13].

⁷Regiones del espectro electromagnético reservadas para aplicaciones industriales, científicas y médicas.

⁸Un canal es lo que se constituye al hacer uso del medio inalámbrico para transmitir datos entre dos dispositivos con capacidad de comunicación inalámbrica [21].

⁹El espaciamiento o separación entre canales es la diferencia entre las frecuencias centrales de dos canales no superpuestos y adyacentes del transmisor de radio [21].

¹⁰Canales reservados para las señales de control y sincronización.

La conexión mediante Bluetooth¹¹ se realiza por medio de un módulo muy común, compatible con Arduino y, por tanto, con la placa NANO. Un módulo es un circuito integrado que dota de nuevas capacidades a las placas de desarrollo. Estos módulos están diseñados para funciones específicas y su hardware posee una distribución y disposición de pines que permiten conectarlos directamente a las placas (shields) o insertarlos en placas de prueba (protoboards). En este trabajo se emplea el módulo Bluetooth HC-05, el cual utiliza la versión v2.0+EDR¹² que permite una transferencia de datos de hasta 3 Mb/s (Bluetooth Classic) con transceptor de radio completo¹³ de 2,4 GHz y con una antena integrada [22]. El alcance de la antena puede llegar hasta los 10 m, aunque depende de factores como las condiciones ambientales, la presencia de obstáculos y la interferencia ocasionada por otros dispositivos electrónicos. Sin embargo, en este caso, las condiciones del entorno no representan inconvenientes significativos para el buen desempeño del Sistema de Transmisión Inalámbrica de Datos, pues opera dentro de un laboratorio cerrado, sin divisiones internas que puedan afectar la propagación de las señales y relativamente lejos de la fuente de iones y de la sonda. La figura 3.3 muestra el módulo HC-05 que se utiliza en este proyecto.

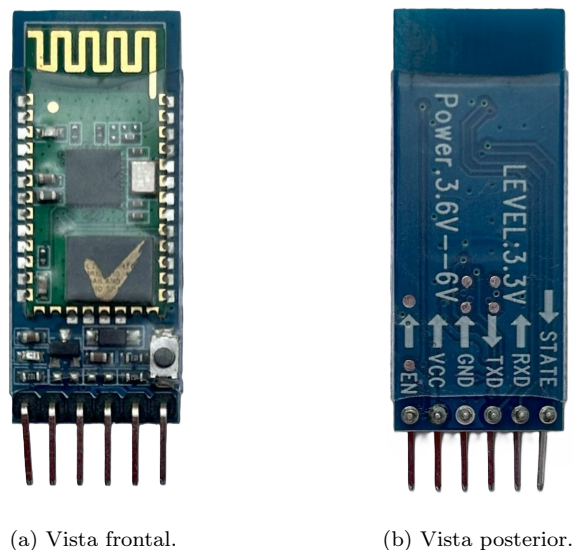


Figura 3.3. Módulo Bluetooth HC-05

¹¹En adelante, y con el fin de simplificar la escritura, se omite el símbolo ®, aunque se reconoce y respeta la condición legal de marca registrada de las tecnologías Bluetooth, desarrollada, gestionada y licenciada por *The Bluetooth Special Interest Group (Bluetooth SIG)*.

¹²La versión v2.0+EDR fue la segunda gran versión de Bluetooth cuya principal característica fue la introducción de la denominada Enhanced Data Rate (Velocidad de Datos Mejorada).

¹³Un transceptor de radio completo es un dispositivo que posee todos los componentes necesarios para llevar a cabo las dos funciones en la comunicación: transmisión y recepción de datos.

3.1.3. MATLAB®

MATLAB® es una plataforma de programación y cálculo numérico para el análisis de datos, desarrollo de algoritmos y creación de modelos que combina un entorno de desarrollo (IDE) con un lenguaje de programación. MATLAB¹⁴ es un acrónimo de «Matrix Laboratory» que refleja su propósito original, el cual era simplemente una calculadora de matrices interactiva, pero que ha evolucionado incluyendo una gran variedad de toolboxes de modelado y simulación para satisfacer las necesidades de ingenieros y científicos [15]. Entre sus prestaciones se encuentran la visualización gráfica de datos, creación de scripts, creación de apps, integración con otros lenguajes de programación como Python, C/C++, Fortran, entre otros; así como la integración con diversos hardwares como Raspberry Pi™, Android™, Texas Instruments® y Arduino®, entre otros [14].

3.2. Diseño

3.2.1. Montaje experimental para la caracterización de un haz de iones

Como se mencionó en la sección 3.1, el diseño del Sistema de Transmisión Inalámbrica de Datos¹⁵, SITID, contempla no solo la transmisión sino también la adquisición de los datos. Para medir el potencial de repulsión $v(t)$, el cual es una variable controlada que varía en el rango $[0, V_{\text{máx}}]$, donde $V_{\text{máx}}$ puede alcanzar valores de varios cientos de volts o incluso unos pocos kilovolts, es necesario implementar un sistema de acondicionamiento de la señal que escale su amplitud al rango admisible por el ADC del ATmega328P de la placa NANO. Por otro lado, para medir la intensidad de la corriente iónica $i^+(t)$, la cual tiene una amplitud muy pequeña (del orden de los microamperes o miliamperes), se conecta un resistor en serie con el electrodo de medición de la sonda para medir la tensión del resistor y así obtener medidas indirectas de $i^+(t)$. Sin embargo, debido a que los valores de resistencia adecuados para estas aplicaciones están en el rango de $100\ \Omega$ a $10\ \text{k}\Omega$, la señal de tensión aún tiene una amplitud muy pequeña, por lo que también es necesario implementar un sistema de acondicionamiento de la señal que escale su amplitud al rango admisible por el ADC del ATmega328P de la placa NANO. En la figura 3.4 se muestra un esquema general simplificado de todo el montaje

¹⁴En adelante, y con el fin de simplificar la escritura, se omite el símbolo ®, aunque se reconoce y respeta la condición legal de marca registrada de MATLAB, desarrollado por MathWorks.

¹⁵El Sistema de Transmisión Inalámbrica de Datos es la solución integral elaborada en este trabajo y comprende tanto el hardware para la adquisición y transmisión de datos, como el software desarrollado: en Arduino, para gobernar el funcionamiento de la placa NANO, y en MATLAB, para la creación de la interfaz gráfica de usuario desde la cual se controla todo el proceso.

experimental para la caracterización de un haz de iones. El esquema electrónico detallado del sistema de acondicionamiento de las señales de potencial de repulsión e intensidad de corriente iónica se muestra en la figura 3.5.

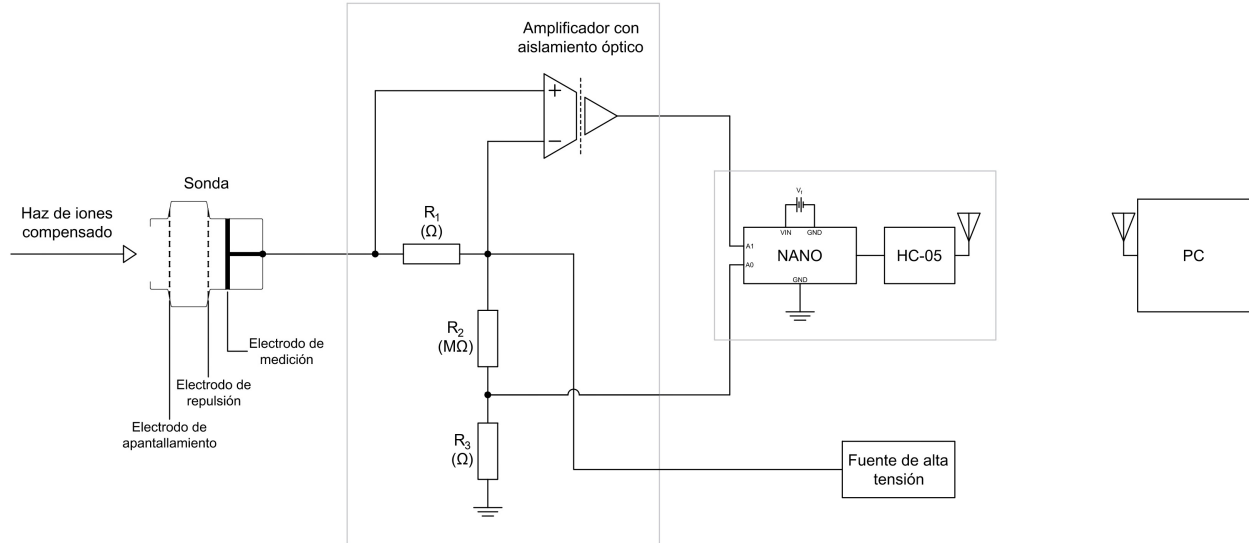


Figura 3.4. Esquema general simplificado del montaje experimental para la caracterización de un haz de iones implementando el SITID, el cual se integra a la sonda por medio del sistema de acondicionamiento de las señales de potencial de repulsión e intensidad de corriente iónica.

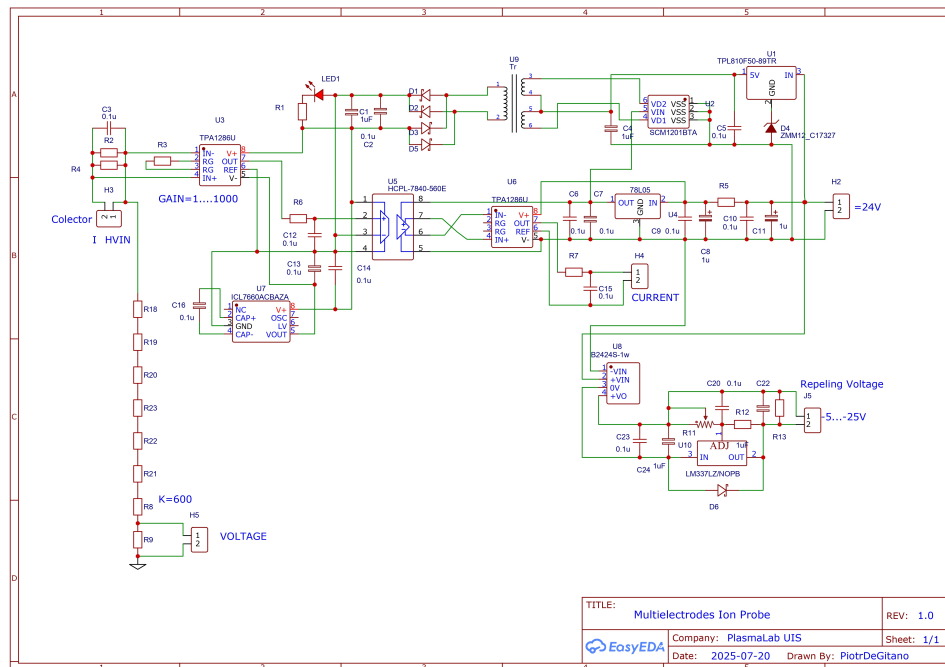


Figura 3.5. Esquema electrónico del sistema de acondicionamiento de las señales $v(t)$ e $i^+(t)$.

3.2.2. Esquema de conexiones del SITID

Esencialmente, el hardware del SITID se compone de dos canales analógicos de entrada físicos (puntos eléctricos) para la adquisición de los datos y, en su interior, de dos pares de canales digitales de entrada y salida, también puntos eléctricos, que constituyen la interfaz de la comunicación serie por UART entre el microcontrolador de la placa NANO y el módulo Bluetooth HC-05, siendo este último el responsable de enviar los datos a través de un canal digital de salida inalámbrico. Con el fin de maximizar la velocidad de transferencia de datos entre el microcontrolador y el módulo, se utilizan los pines digitales RX0 y TX1 de la placa, diseñados y reservados exclusivamente para la comunicación serie por UART, los cuales se conectan por medio de un DIP switch de 2 vías a los pines TXD y RXD del módulo, respectivamente. Esto se hace con el objetivo de aislar los puertos serie del módulo y del microcontrolador cuando se requiera, ya que los pines RX0 y TX1 de la placa son los que utiliza el microcontrolador para la comunicación con el PC (a través de un convertidor USB-TTL integrado en la placa), por ejemplo, durante el proceso de carga de los sketches. De este modo, se evitan interferencias y conflictos en el puerto serie del microcontrolador que puedan ocasionar problemas en la comunicación con el PC.

Los pines analógicos A0 y A1 se utilizan para capturar los datos de las señales de tensión asociadas a las señales de potencial de repulsión e intensidad de corriente iónica, respectivamente. El sistema contempla el uso de una fuente de alimentación propia, basada en baterías Li-ion recargables 18650, que suministre energía con una tensión V_f entre 7 V y 12 V. El SITID también incorpora dos LED y un buzzer que proporcionan ayudas visuales y auditiva que permiten al usuario verificar el estado de funcionamiento del sistema e identificar fallos en la conexión inalámbrica. Su esquema de conexiones detallado se muestra en la figura 3.6.

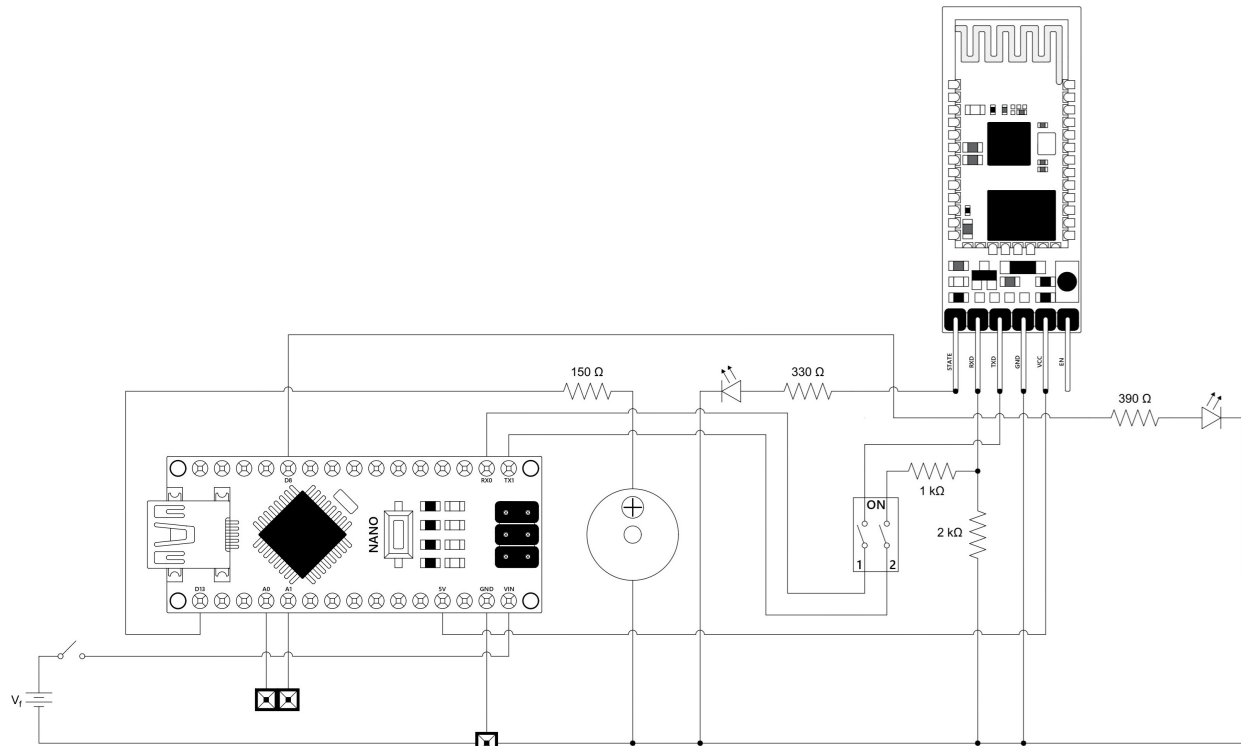


Figura 3.6. Esquema de conexiones del SITID.

3.2.3. Protocolo de transmisión de los datos

Debido a la imposibilidad del microcontrolador para realizar las dos lecturas analógicas de tensión junto con el registro del tiempo de manera simultánea, se hace necesario capturar un dato a la vez, por lo que el núcleo funcional del SITID consiste en el registro individual de cuatro datos (dos marcas de tiempo y dos lecturas de tensión) y su transmisión de forma conjunta en una única trama o paquete de datos. Esta trama de datos se transmite, primero, desde la placa hacia el módulo mediante comunicación serie por UART y, posteriormente, desde el módulo hacia el PC mediante Bluetooth.

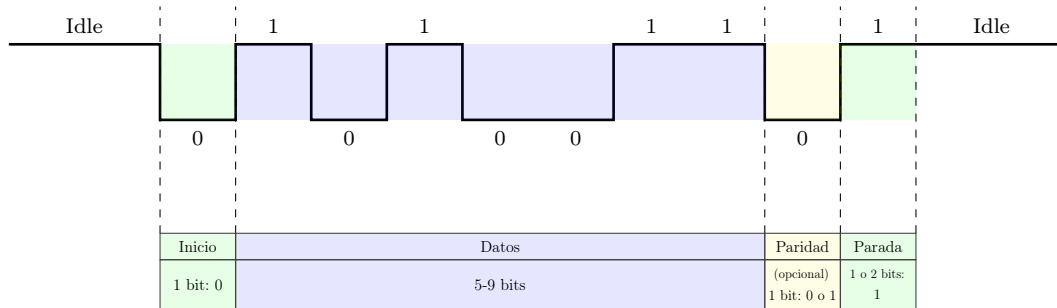
El registro de los datos de tiempo se realiza con la función *micros()*, la cual devuelve el número de microsegundos transcurridos desde el inicio de la ejecución del programa y tiene una resolución de $4\ \mu\text{s}$. Esta función permite el registro del tiempo con la máxima resolución temporal ofrecida por el microcontrolador. Este número se almacena como una variable de tipo *unsigned long*, la cual permite almacenar valores enteros no negativos de 32 bits (4 bytes), por lo que su rango de valores va desde 0 hasta $2^{32} - 1$ [2]. Una limitación importante al usar esta función es que, si el tiempo de ejecución del programa cargado en el microcontrolador supera el valor $2^{32} - 1\ \mu\text{s} = 4\ 294\ 967\ 295\ \mu\text{s}$, ocurre lo que se conoce como desbordamiento,

ocasionando que el registro del tiempo se reinicie después de aproximadamente 72 minutos. El valor de tiempo correspondiente a cada lectura de tensión se calcula como la diferencia entre el valor devuelto por dicha función y un valor de tiempo constante registrado al iniciar el proceso de captura y transmisión de los datos. Por otro lado, los registros de los valores de tensión se realizan con la función *analogRead()*.

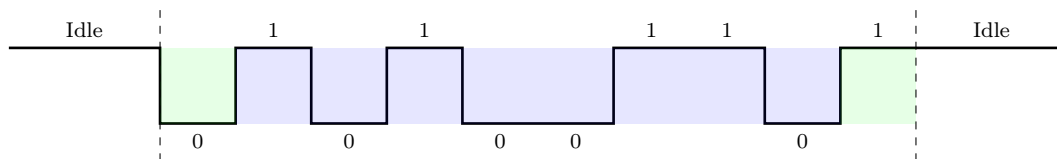
Se define un protocolo de comunicación propio muy sencillo para establecer el formato y la estructura de la trama de datos de cada ciclo de adquisición de datos. En este protocolo, los datos se transmiten uno a uno en serie por UART como una cadena de caracteres (texto) en código ASCII, en un orden específico, separados entre sí por un espacio y con los caracteres de retorno de carro y salto de línea al final, constituyendo, así, la trama o paquete de datos propiamente dicho. Un ejemplo de una trama de datos es el siguiente: 47992101 1011 47992263 614\r\n, donde

- 47992101 es el tiempo que corresponde a la lectura de tensión asociada al potencial de repulsión.
- 1011 es la lectura de tensión a través del pin analógico A0 asociada al potencial de repulsión.
- 47992263 es el tiempo que corresponde a la lectura de tensión asociada a la intensidad de corriente iónica.
- 614 es la lectura de tensión a través del pin analógico A1 asociada a la intensidad de corriente iónica.
- \r es el carácter de retorno de carro.
- \n es el carácter de salto de línea.

Como se mencionó anteriormente, la transmisión de los datos desde la placa NANO hacia el módulo HC-05 se realiza a través de la interfaz UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) que constituye el puerto serie de la placa (y el del módulo). Esta interfaz implementa una comunicación serie; es decir, envía los datos bit a bit de manera secuencial a través de una única línea de datos (entre el pin TX1 y el pin RXD), utilizando únicamente dos estados lógicos, 0 y 1, representados por dos niveles de tensión, 0 V y 5 V. En este caso, el SITID codifica cada byte (8 bits) de datos en el formato habitual 9600 8N1, que significa 9600 baud, 8 bits de datos, sin bit de paridad (N) y 1 bit de parada [25], para un total de 10 bits por cada byte (ya que siempre incluye un bit de inicio correspondiente a un 0 lógico), como se muestra en la figura 3.7b.



(a) Estructura de una trama o paquete de datos en comunicación serie por UART.



(b) Trama de datos en formato 8N1.

Figura 3.7. Ilustración de estructura de una trama de datos en comunicación serie por UART y el formato 8N1 utilizado por el SITID para la transmisión y recepción de los datos. El término «Idle» hace referencia al estado de reposo de la señal digital antes y después del envío (o recepción) de una trama de datos (figuras basadas en la figura titulada «Frame Format» de la sección *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (UART)* de la documentación de aprendizaje de la página oficial de Arduino [19]).

La velocidad de transmisión de datos en el contexto de Arduino generalmente se expresa en baud (Bd), unidad que se define como el número de cambios de estado o símbolos en una señal que ocurren en un segundo en la línea de comunicación [8]. Un símbolo puede ser un cambio en algún atributo de la señal, por ejemplo, amplitud, frecuencia o fase. Teniendo en cuenta que, en este tipo de comunicación, solo se tienen dos símbolos, uno para cada bit (0 y 1), la tasa de símbolos o baud es igual a la tasa de bit; es decir, 1 baud = 1 bit/s [8]. Así, las *data rate* soportadas tanto por el módulo como por el microcontrolador se pueden considerar medidas en bit/s o bps.

3.2.4. Protocolo de recepción de los datos

Para visualizar gráficamente los datos recibidos, es necesario extraerlos de la cadena de caracteres y convertirlos en valores numéricos. Estos valores se almacenan en un vector fila y se verifica que dicho vector contenga exactamente cuatro elementos y que el segundo valor de tiempo sea mayor que el primero. Estas dos comprobaciones se realizan debido a que, durante la etapa de pruebas del SITID, se evidenció que algunas tramas de datos pueden no contener los cuatro datos del ciclo de adquisición o presentar un truncamiento en el segundo valor de tiempo, representando un valor de tiempo menor que el primer dato de tiempo. De

este modo, se evitan errores que pueden ocasionar la detención abrupta de la ejecución del programa de MATLAB.

Para representar visualmente los datos en las escalas correctas, es necesario aplicar los factores de escala correspondientes que permitan reconstruir las señales originales. Estos factores de escala se pueden determinar a partir de la representación de los sistemas de acondicionamiento de las señales por medio de diagramas de bloques, cada uno de los cuales, en su forma más general, está constituido por un único bloque que representa todo el tratamiento que realiza el sistema de acondicionamiento sobre la señal de entrada para producir la correspondiente señal de salida (figura 3.8).

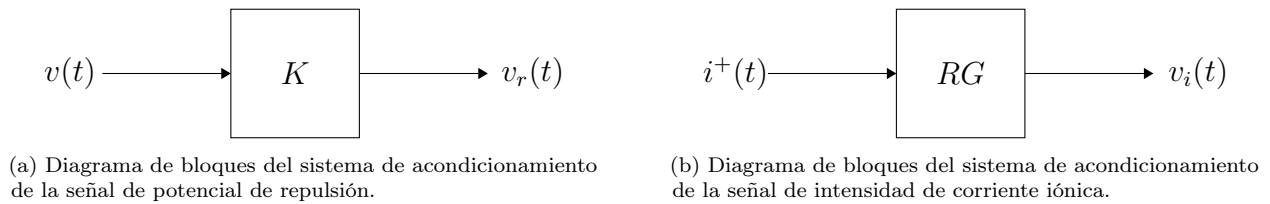


Figura 3.8. Representación más general mediante diagramas de bloques de los sistemas de acondicionamiento de las señales de potencial de repulsión e intensidad de corriente iónica.

El ADC del microcontrolador admite señales analógicas de tensión entre 0 V y 5 V (valor máximo) y tiene una resolución de 10 bits; es decir, entrega valores enteros de 0 a $2^{10} - 1$, que representan 1024 valores discretos o niveles de tensión dentro del rango $[0, V_{ref}]$, donde V_{ref} es la tensión de referencia utilizada por el ADC. Por defecto, el valor de referencia es 5 V, la tensión de operación del microcontrolador¹⁶; no obstante, este valor puede ser modificado según las necesidades del proyecto. Lo ideal es que los sistemas de acondicionamiento de las señales escalen sus amplitudes al rango $[0, V_{ref}]$ para aprovechar al máximo la resolución del ADC. La señal (digital) de tensión acondicionada $v_r[t]$ asociada al potencial de repulsión se relaciona con las lecturas $v_{A0}[t]$ del pin analógico A0 de la placa NANO por

$$v_r[t] = \frac{V_{ref}}{1023} v_{A0}[t]$$

Suponiendo que $v_r[t]$ varía en el rango $[0, V_{r-\text{máx}}]$; es decir, el sistema de acondicionamiento escala el rango $[0, V_{\text{máx}}]$ al rango $[0, V_{r-\text{máx}}]$, con $V_{r-\text{máx}} \leq V_{ref}$, entonces $v[t]$ se relaciona con $v_r[t]$ por

$$v[t] = \frac{V_{\text{máx}}}{V_{r-\text{máx}}} v_r[t]$$

¹⁶La tensión de operación del microcontrolador puede ser distinta a la tensión de alimentación de la placa NANO.

Así,

$$v[t] = Kv_r[t]$$

donde

$$K = \frac{V_{\text{máx}}}{V_{r\text{-máx}}}$$

Del mismo modo, la señal (digital) de tensión acondicionada $v_i[t]$ asociada a la intensidad de corriente iónica se relaciona con las lecturas $v_{A1}[t]$ del pin analógico A1 de la placa NANO por

$$v_i[t] = \frac{V_{ref}}{1023}v_{A1}[t]$$

En el sistema de acondicionamiento de la señal de intensidad de corriente iónica se pueden distinguir dos operaciones o etapas: La primera consiste en la obtención de una señal de tensión asociada a la corriente iónica mediante un resistor de resistencia R conectado en serie con el electrodo de medición de la sonda (colector). Dicha señal de tensión tiene amplitud $Ri^+(t)$. La segunda etapa corresponde a la amplificación de la tensión del resistor con una ganancia G hasta el nivel requerido por el ADC del microcontrolador, obteniéndose una señal de tensión de amplitud $GRi^+(t)$. Los valores de R y G se seleccionan de tal manera que $v_i[t]$ varíe en el rango $[0, V_{i\text{-máx}}]$, con $V_{i\text{-máx}} \leq V_{ref}$, por lo que $i^+[t]$ se relaciona con $v_i[t]$ por

$$GRi^+[t] = v_i[t]$$

luego

$$i^+[t] = \frac{1}{GR}v_i[t]$$

y, en miliamperes,

$$i^+[t] = \frac{1000}{GR}v_i[t]$$

Así,

$$i^+[t] = |Y|v_i[t]$$

donde

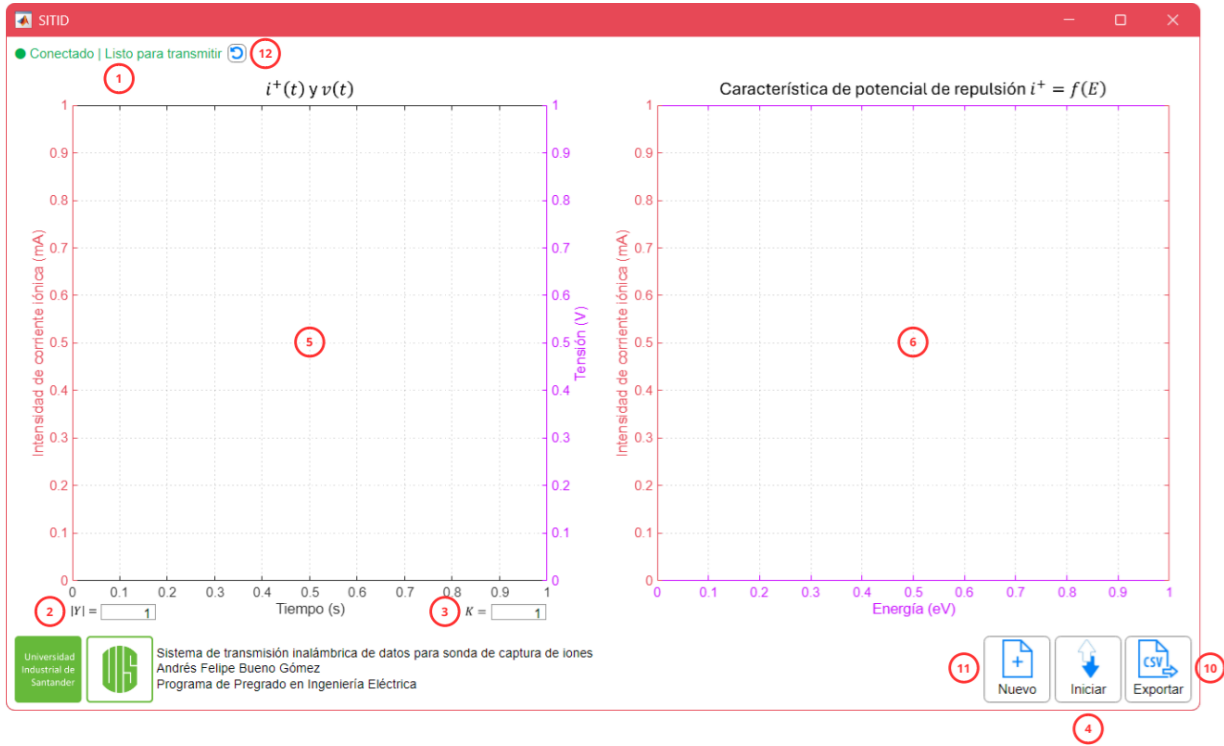
$$|Y| = \frac{1000}{GR}$$

Antes de iniciar el proceso de captura y transmisión de los datos, es necesario ingresar los valores de K y $|Y|$ en los campos correspondientes en la interfaz gráfica de usuario (IGU) y, si es necesario, modificar el valor de V_{ref} directamente en los códigos de Arduino y MATLAB. En el código de Arduino es necesario agregar algunas líneas de código para modificar este valor

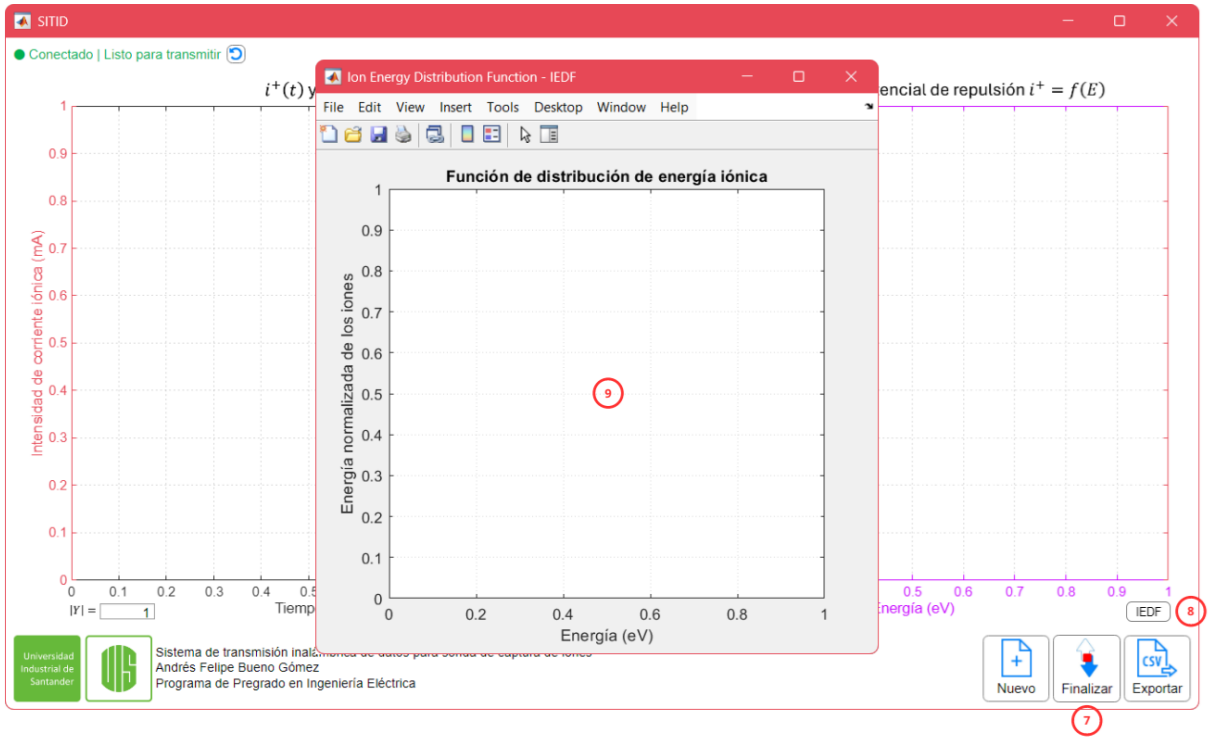
de referencia. En el código de MATLAB ya está definida una variable para este propósito. Si se desea simplemente visualizar las señales acondicionadas, entonces $K = |Y| = 1$.

3.2.5. Interfaz gráfica de usuario para la recepción y visualización de los datos

A continuación, se muestra el diseño de la IGU desarrollada en MATLAB para el control del proceso de adquisición, transmisión, recepción y visualización de los datos en tiempo real. La tabla 3.2 presenta una descripción detallada de cada uno de los elementos gráficos de la IGU identificados en las figuras 3.9a y 3.9b.



(a)



(b)

Figura 3.9. Interfaz gráfica de usuario en MATLAB.

Elemento gráfico	Tipo	Descripción
1	Etiqueta	Texto dinámico que indica el estado operativo del sistema.
2	Campo de edición	Permite establecer el factor de escala para la reconstrucción de la señal de intensidad de corriente iónica.
3	Campo de edición	Permite establecer el factor de escala para la reconstrucción de la señal de potencial de repulsión.
4	Botón	Inicia del proceso de adquisición, transmisión, recepción y representación visual de los datos.
5	Ejes de coordenadas	Área de visualización de los datos de las señales de intensidad de corriente iónica (a la izquierda) y potencial de repulsión (a la derecha).
6	Ejes de coordenadas	Área de visualización de los datos de la característica de potencial de repulsión $i^+ = f(E)$.
7	Botón	Finaliza del proceso de adquisición, transmisión, recepción y representación visual de los datos.
8	Botón	Calcula los datos de la función de distribución de energía iónica y abre una ventana auxiliar para visualizar gráficamente estos datos.
9	Ejes de coordenadas	Área de visualización de los datos de la IEDF.
10	Botón	Exporta los datos de las señales de potencial de repulsión e intensidad de corriente iónica en un formato .csv.
11	Botón	Inicia una nueva sesión de adquisición, transmisión, recepción y representación visual de los datos eliminando toda la información de la sesión actual.
12	Botón	Reinicia el proceso de conexión por Bluetooth del hardware del SITID con el hardware del computador personal que recibirá la información.

Tabla 3.2. Descripción de los elementos gráficos que componen la interfaz gráfica de usuario de MATLAB.

3.3. Construcción

La construcción del Sistema de Transmisión Inalámbrica de Datos se llevó a cabo siguiendo los pasos enumerados a continuación:

1. Configuración del módulo Bluetooth HC-05

El módulo se configuró con los siguientes parámetros:

- Nombre: SITID
- Modo de trabajo: Esclavo
- Contraseña: 3101
- Parámetros de comunicación: 9600 8N1

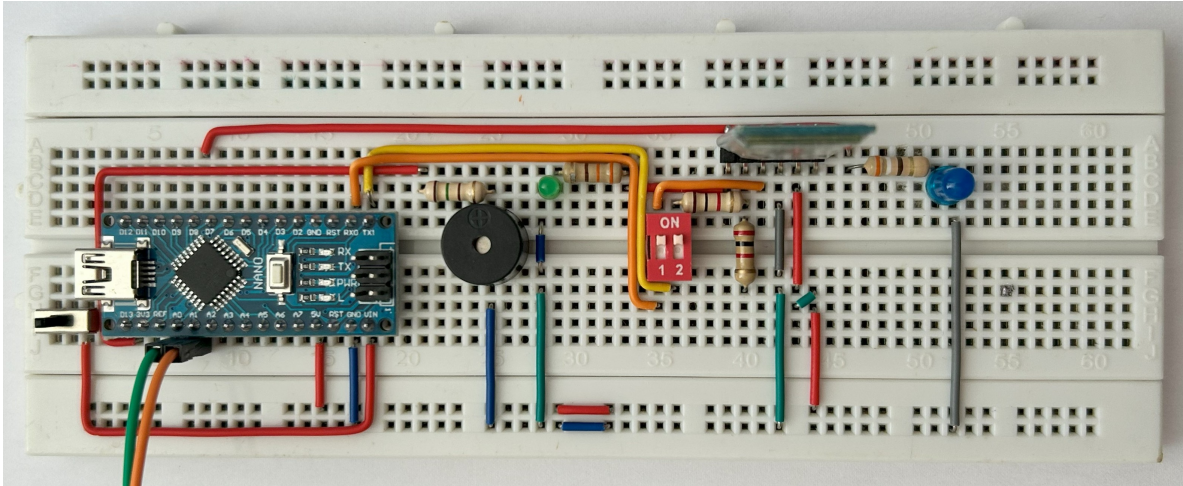
Los Anexos 1 y 2 proporcionan enlaces directos al instructivo y al programa de Arduino para la configuración del módulo, respectivamente.

2. Vinculación del módulo con el computador

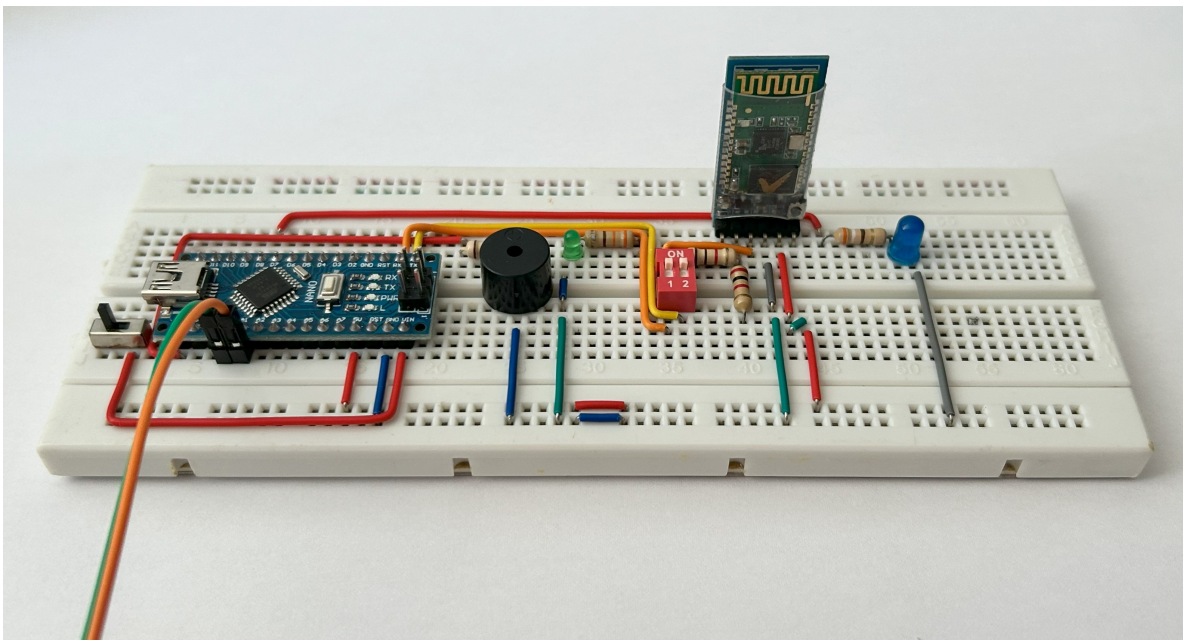
El anexo 3 proporciona un enlace directo al instructivo para la vinculación del módulo con el computador.

3. Construcción del prototipo del SITID

En la figura 3.10 se muestra el montaje experimental del prototipo del SITID realizado sobre una placa de pruebas.



(a)



(b)

Figura 3.10. Montaje experimental del prototipo del SITID sobre placa de pruebas.

4. Programación del microcontrolador (en Arduino)

El anexo 4 proporciona un enlace directo a una carpeta comprimida que contiene el programa de Arduino.

5. Desarrollo de la interfaz gráfica de usuario (en MATLAB)

El anexo 5 proporciona un enlace directo a una carpeta comprimida que contiene el programa de MATLAB.

6. Pruebas de funcionamiento

Para la validación del funcionamiento del SITID, se emplearon dos potenciómetros para variar de forma manual las tensiones registradas por los pines analógicos de la placa de NANO. En las figuras 3.11 y 3.12 se muestran el esquema de conexiones y el montaje en placa de pruebas, respectivamente. La figura 3.13 muestra una captura de la IGU durante la ejecución de una de las últimas pruebas de funcionamiento de esta etapa de pruebas.

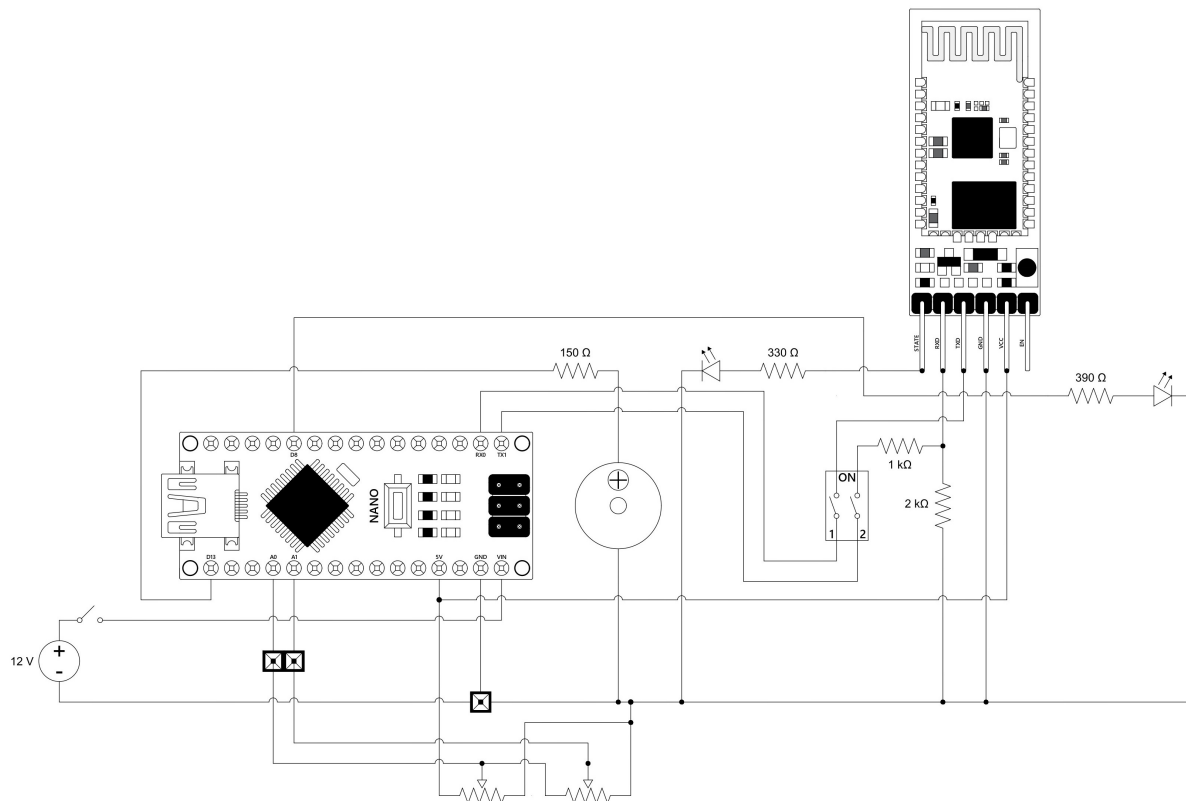


Figura 3.11. Esquema de conexiones para validar el funcionamiento del SITID. Los cursores de los potenciómetros proporcionan salidas de tensión entre 0 V y 5 V.

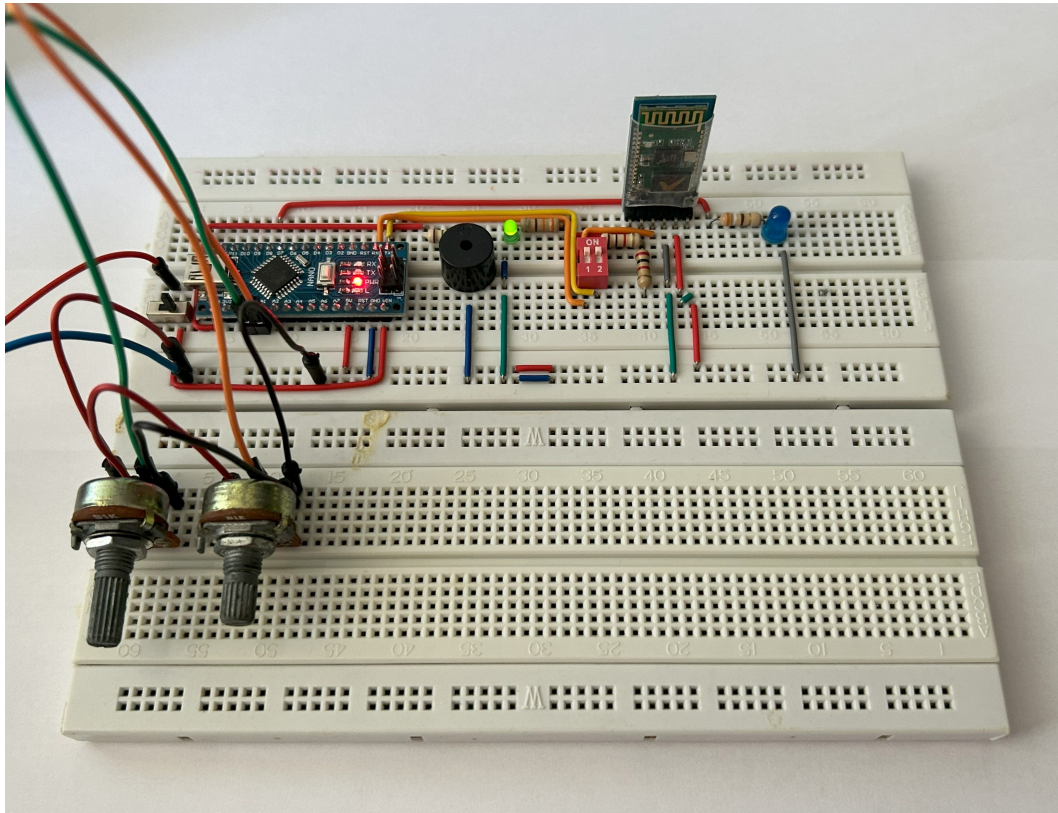


Figura 3.12. Montaje en placa de pruebas para validar el funcionamiento del SITID.

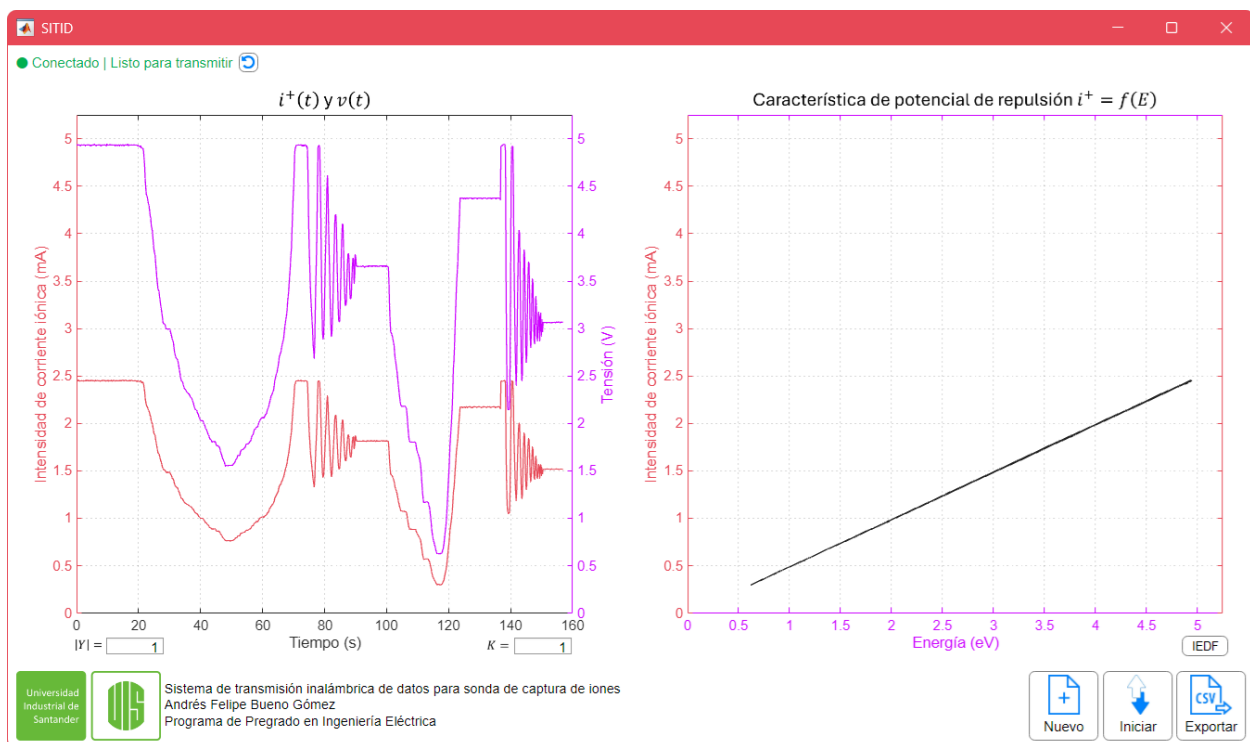


Figura 3.13. Visualización de los datos recibidos en tiempo real.

Durante esta etapa, se evidenció que algunas tramas de datos pueden no contener los cuatro datos del ciclo de adquisición o presentar un truncamiento en el segundo valor de tiempo, representando un valor menor que el primer dato de tiempo, afectando directamente a la gráfica de $i^+(t)$. Para superar este inconveniente, se realizó una modificación en el programa de MATLAB para que se verifique que el vector en el que se almacenan los datos contenga exactamente cuatro elementos y que el segundo valor de tiempo sea mayor que el primero. De este modo, se evitan errores que pueden ocasionar la detención abrupta de la ejecución del programa de MATLAB.

Las señales de interés en este tipo de experimentos de caracterización de haces de iones pueden tener una duración relativamente corta. Para evaluar la frecuencia máxima efectiva del SITID, se realizaron pruebas utilizando señales rectangulares positivas con ciclo útil del 50 % y duraciones de pulso decrecientes desde 1000 ms hasta 1 ms (figura 3.14). Esto requirió modificar la velocidad de comunicación por UART del módulo Bluetooth a 57600 Bd¹⁷ y establecer un retraso de 5 ms en la ejecución del programa de Arduino (sin este retraso, el hardware deja de responder). Además, fue necesario inhabilitar la representación en tiempo real de los datos para lograr el máximo rendimiento del sistema. Se realizaron lecturas de 12 señales (12 trenes de 5 pulsos cada uno) y se calcularon los promedios de las frecuencias y las amplitudes de las señales registradas por el sistema. Los resultados se muestran en la figura 3.14 y la tabla 3.3.

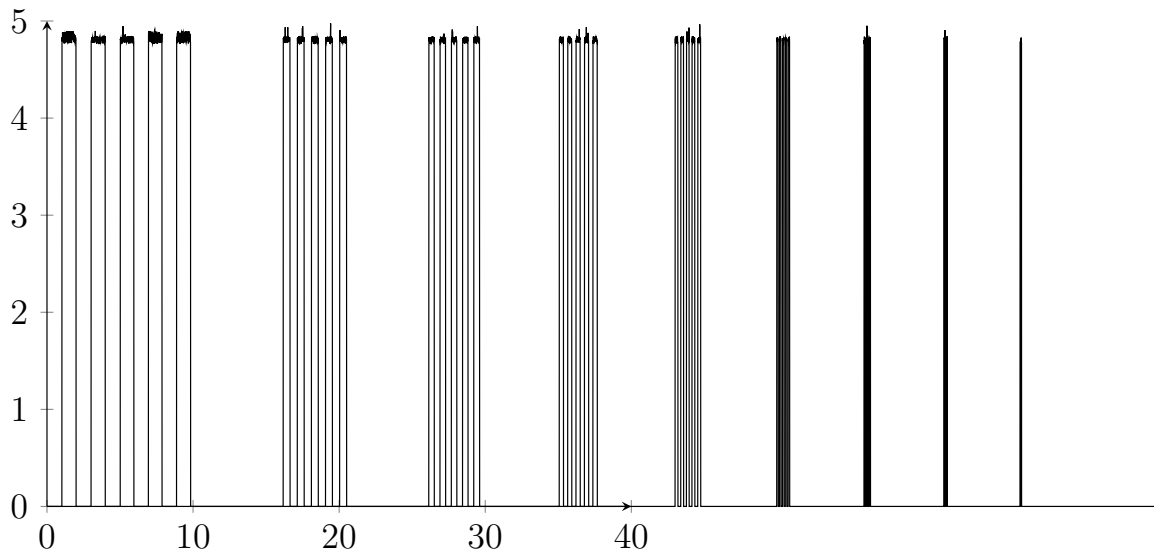


Figura 3.14. Señales rectangulares de prueba.

¹⁷A 115200 Bd el canal tiende a hacerse inestable, por lo que se configuró a la velocidad soportada inmediatamente anterior.

Frecuencia de la señal (Hz)	Frecuencia de la señal registrada (Hz)	Error en frecuencia	Amplitud promedio (V)	Error en amplitud
0,50	0,51	1.28 %	4,7772	4,46 %
1	1,03	2.50 %	4,7767	4,47 %
1,25	1,28	2.49 %	4,7756	4,49 %
1,67	1,72	3.38 %	4,7749	4,50 %
2,50	2,62	4.51 %	4,7742	4,52 %
5	5,47	8.62 %	4,7719	4,56 %
10	12,30	18.68 %	4,7703	4,59 %
20	24,61	18.72 %	4,7691	4,62 %
50	-	-	-	-
100	-	-	-	-
250	-	-	-	-
500	-	-	-	-

Tabla 3.3. Frecuencias de las señales registradas por el sistema.

En este ejercicio se recopilamos alrededor de 10 000 tramas. Con estos datos, se calculó la frecuencia de muestreo máxima del sistema, la cual es de aproximadamente 100,86 Hz. Según el teorema de muestreo de Nyquist-Shannon, la frecuencia de muestreo de un sistema de adquisición de datos debe ser de, al menos, el doble de la frecuencia máxima de la señal de interés para reconstruirla correctamente. En este caso, el límite teórico de la frecuencia de las señales a registrar es de 50,43 Hz. Por tanto, registrar señales con frecuencias iguales o superiores a este valor conducirá a fenómenos como aliasing, pérdida de amplitud o incluso la desaparición total del pulso en la visualización.

En la figura 3.15 se observa que el sistema es capaz de adquirir múltiples muestras por ciclo cuando la duración del pulso es igual o superior a 25 ms (periodo de la señal de 50 ms) pero, para pulsos de 10 ms o menores, el sistema no puede registrar más de una lectura en cada pulso o simplemente no logra registrar valores de amplitud distintos de cero, lo que concuerda con el límite teórico de la frecuencia de una señal a registrar según el teorema de Nyquist-Shannon. Esto ocasiona una distorsión en la señal adquirida que se visualiza como líneas verticales aisladas o simplemente la amplitud se mantiene en cero de forma constante, e indica que la frecuencia de muestreo del sistema es insuficiente para capturar adecuadamente la forma de la onda con estas frecuencias. Así, el sistema no puede distinguir señales periódicas de frecuencias mayores a 20 Hz y que, a partir de los 10 Hz, ya presenta un error del 18 % respecto a la frecuencia de la señal original, el cual es significativamente alto. Por otro lado, la

afectación sobre la amplitud promedio de los pulsos, aunque aumenta conforme aumenta la frecuencia, es insignificante (hasta los 20 Hz).

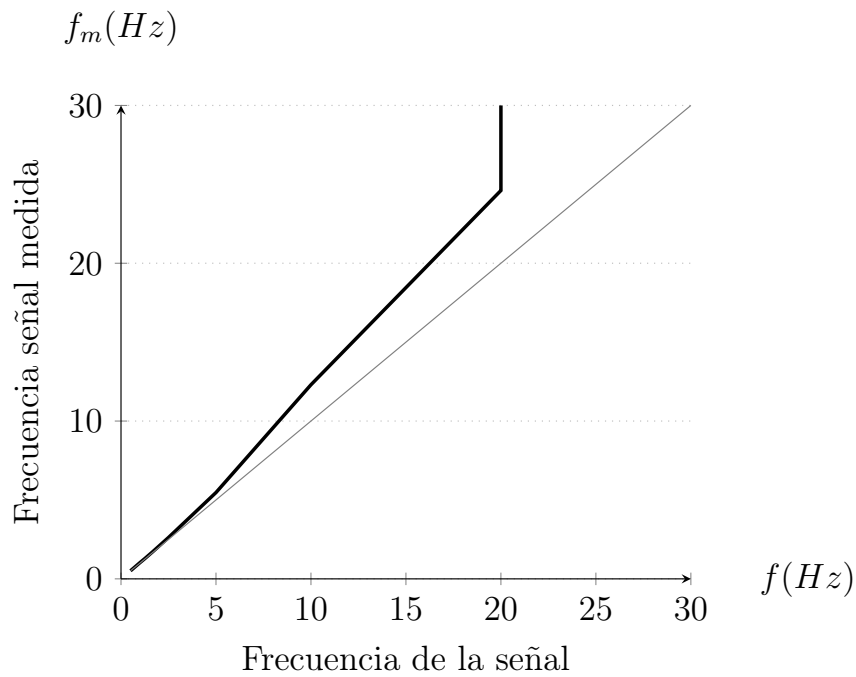


Figura 3.15. Frecuencia de las señales medidas por el sistema.

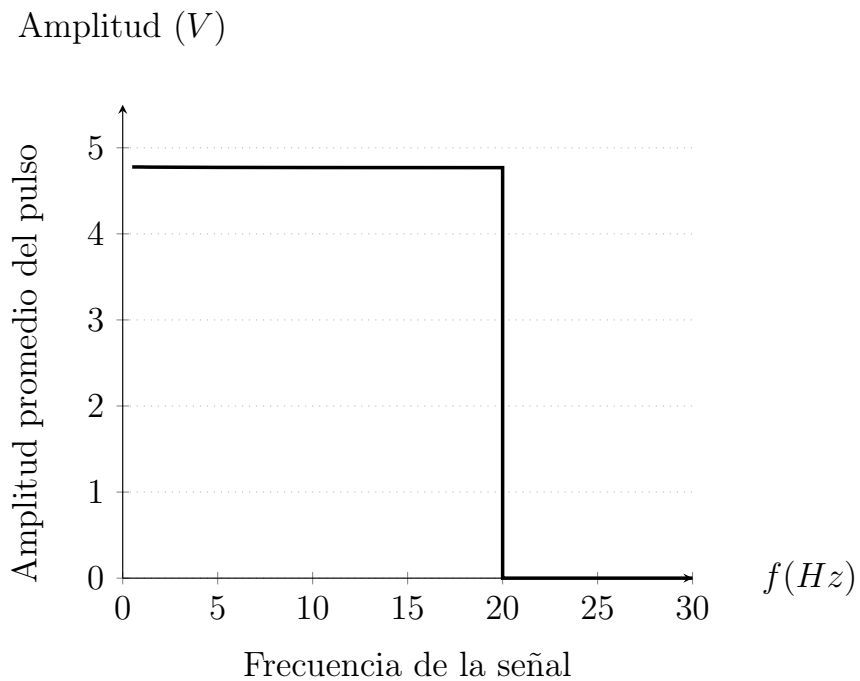


Figura 3.16. Frecuencia de las señales medidas por el sistema.

7. Diseño de la PCB

La placa de circuito impreso (PCB, por sus siglas en inglés) se diseñó en Proteus 8 Professional (figura 3.17).

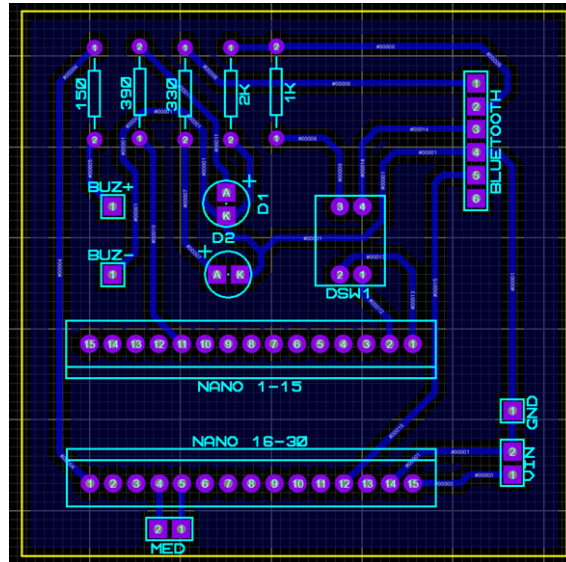


Figura 3.17. Diseño de la PCB.

El anexo 6 proporciona un enlace directo a una carpeta comprimida que contiene los archivos Gerber para la fabricación de la PCB. La figura 3.18 muestra su modelo 3D.

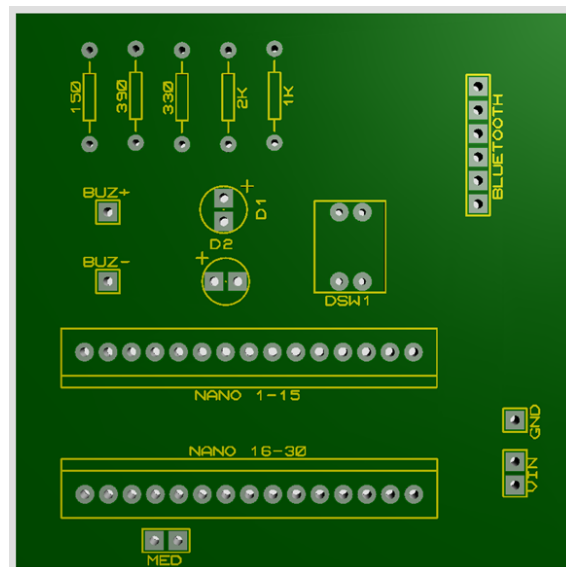


Figura 3.18. Vista superior del modelo 3D de la PCB del SITID.

El modelo 3D de la placa de circuito impreso ensamblada (PCBA, por sus siglas en inglés) se muestra en la figura 3.19. La PCB incorpora conectores tipo hembra

(*female headers*) para insertar tanto la placa NANO como el módulo Bluetooth HC-05, evitando soldarlos a la PCB. Esto facilita su remoción para realizar modificaciones en la programación del microcontrolador o en la configuración del módulo. En el modelo no se visualizan el módulo Bluetooth HC-05 ni el buzzer.

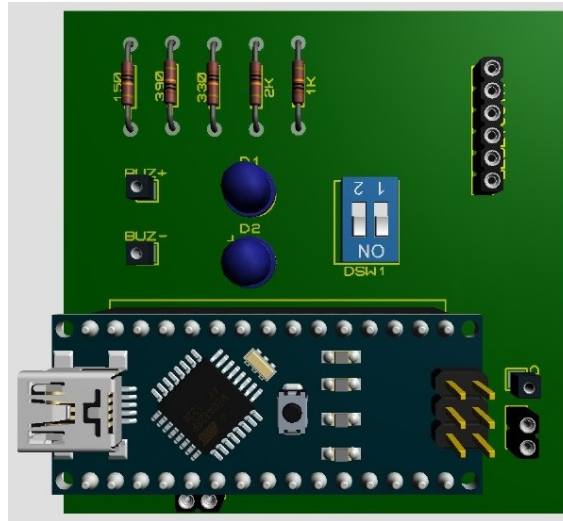


Figura 3.19. Vista superior del modelo 3D de la PCBA del SITID.

8. Ensamblaje de los componentes sobre la PCB

La figura 3.20 muestra el prototipo funcional del Sistema de Transmisión Inalámbrica de Datos.



Figura 3.20. Vista superior de la placa de circuito impreso ensamblada.

3.4. Implementación

La implementación del sistema para la caracterización de un haz de iones se realizó con la configuración descrita anteriormente para lograr el máximo rendimiento del SITID, dedicando los recursos de la placa NANO y el computador únicamente a capturar datos para, posteriormente, procesarlos con el software especializado ProbeDAM. Los resultados del procesamiento de los datos de las dos pruebas realizadas se muestran en las figuras 3.21 y 3.22.

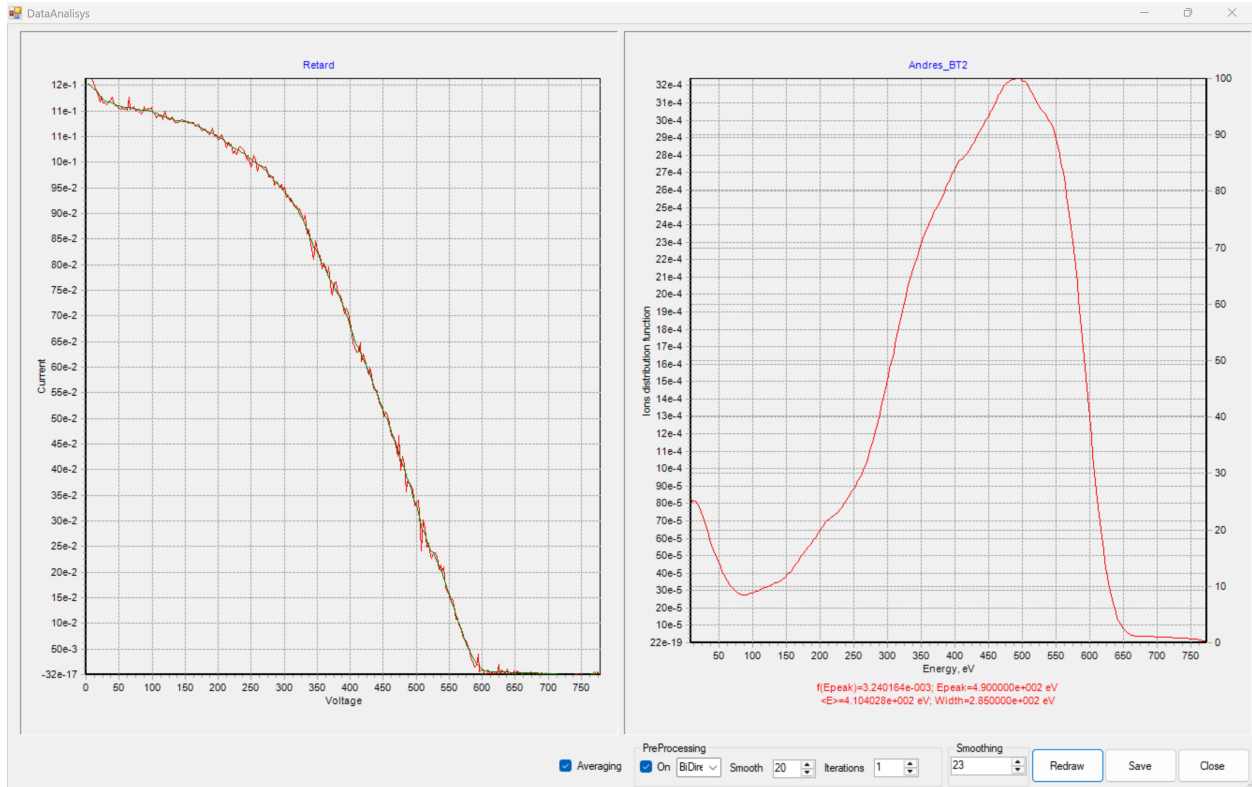


Figura 3.21. Resultados primera prueba de caracterización de un haz de iones.

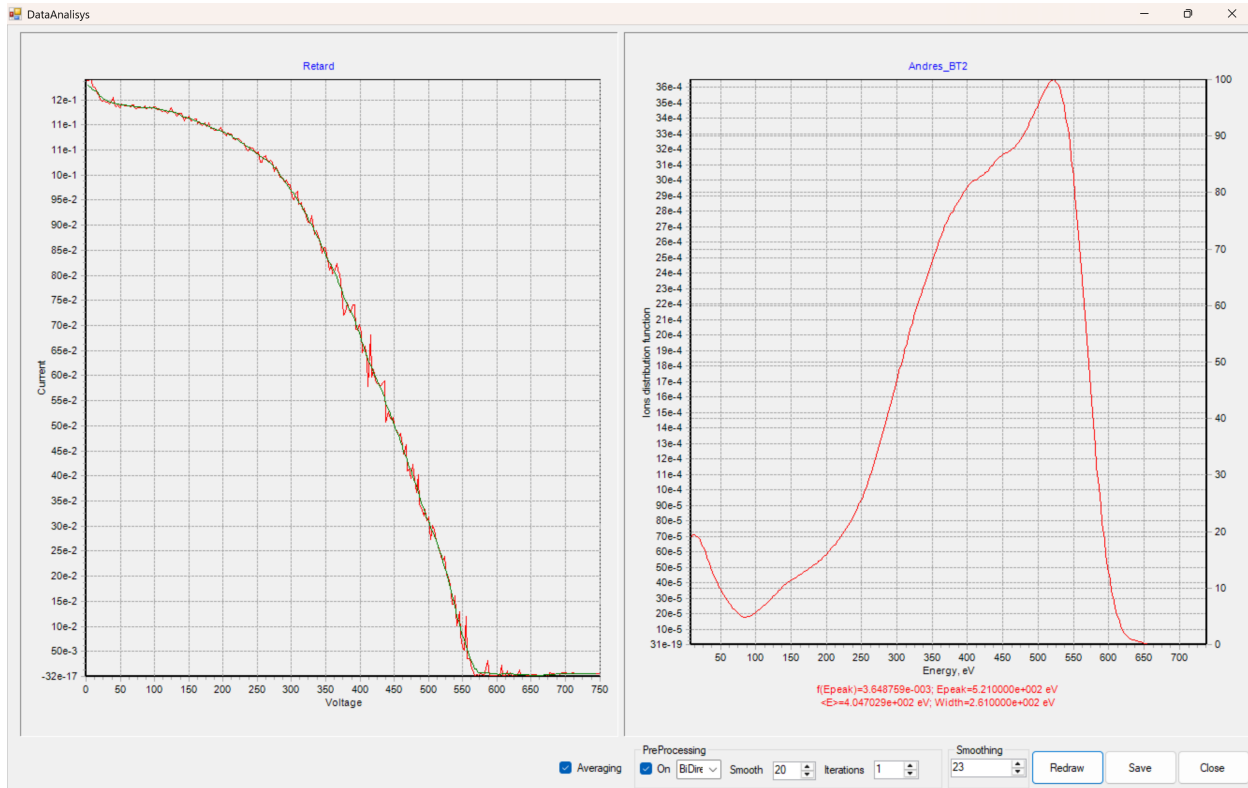


Figura 3.22. Resultados segunda prueba de caracterización de un haz de iones.

3.5. Montaje experimental mejorado

El sistema de acondicionamiento de las señales de potencial de repulsión e intensidad de corriente iónica implementado, cuyo esquema electrónico se muestra en la figura 3.5, es un diseño estándar (y un tanto complejo) que presenta algunas limitaciones técnicas y prácticas. La principal de ellas, y que constituye un obstáculo determinante para la ejecución de experimentos de caracterización de haces de iones, es la imposibilidad de operar con potenciales de repulsión superiores a 1 kV. Esta restricción es impuesta por las especificaciones técnicas del amplificador de instrumentación con aislamiento óptico incorporado en el sistema, el cual tiene la función de proteger al microcontrolador frente a las altas tensiones involucradas durante el proceso experimental.

Para superar este obstáculo, se aprovecha el hecho de que el sistema contempla el uso de una fuente de alimentación propia basada en baterías, lo cual permite proponer un nuevo esquema de acondicionamiento de las señales de interés que prescinde del sistema basado en aislamiento óptico, tomando el propio punto de alta tensión como referencia del SITID y del sistema de acondicionamiento de las señales, como se muestra en la figura 3.23.

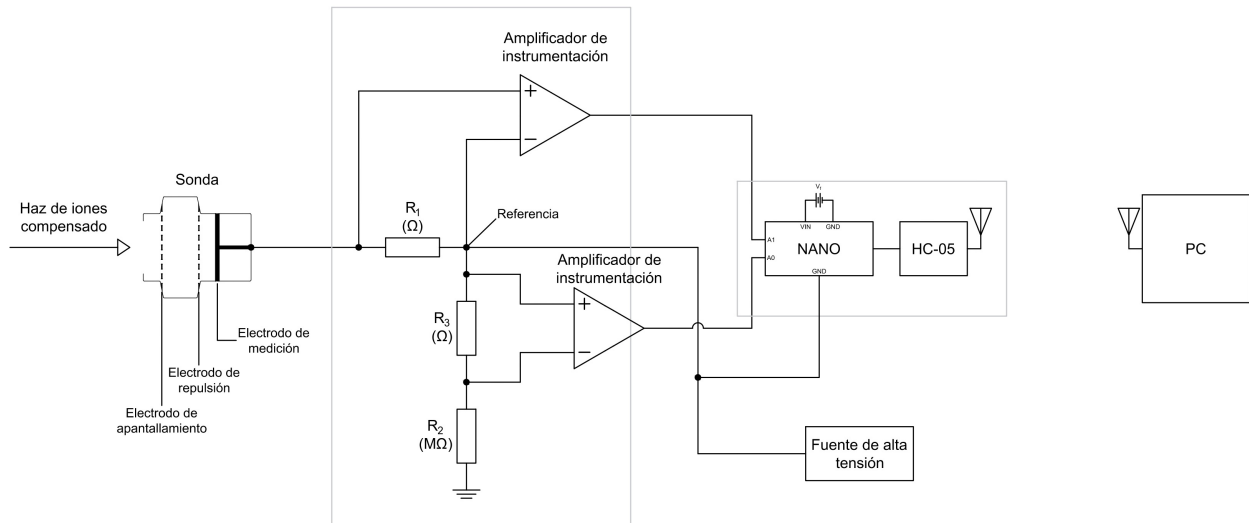


Figura 3.23. Esquema general del nuevo montaje experimental propuesto para la caracterización de un haz de iones implementando el SITID que no requiere del uso de del sistema de acondicionamiento de las señales de potencial de repulsión e intensidad de corriente iónica de la figura 3.5.

Este nuevo sistema no solo simplifica drásticamente la electrónica involucrada en el proceso experimental sino que permite llevar a cabo procesos de caracterización de haces de iones superiores a 1 kV (en teoría, hasta los 3 kV a los que se puede llegar en el laboratorio), ampliando el rango de condiciones tanto de implementación del SITID como de exploración experimental.

CAPÍTULO 4

Conclusiones

A continuación, se presentan las conclusiones de este trabajo, las cuales destacan los principales hallazgos registrados durante su desarrollo.

1. Los resultados experimentales demuestran que es factible implementar un sistema de adquisición y transmisión de datos basado en plataformas de desarrollo como Arduino, empleando módulos complementarios como el HC-05 para la comunicación inalámbrica, en aplicaciones que requieran el registro de señales analógicas de baja frecuencia. La solución desarrollada permite la captura de los datos de interés con una frecuencia de muestreo máxima de 20 Hz y una resolución de 10 bit, lo cual resulta adecuado para aplicaciones experimentales que no exijan alta resolución temporal ni una cuantificación precisa de la amplitud de las señales.
2. La velocidad del canal inalámbrico no se puede modificar y depende exclusivamente del módulo HC-05, la cual es, típicamente, de 3 Mbps. La velocidad de trabajo del sistema depende exclusivamente de la velocidad de la comunicación serie por UART configurada y del retardo establecido en el código de Arduino entre cada ciclo de trabajo del sistema. Para obtener el mayor rendimiento posible ofrecido por el sistema, es necesario deshabilitar la representación gráfica de los datos en tiempo real.
3. El nuevo esquema de acondicionamiento de las señales de potencial de repulsión e intensidad de corriente iónica elimina la limitación impuesta por el sistema basado en aislamiento óptico y permite realizar procesos de caracterización de haces de iones con potenciales de repulsión superiores a 1 kV, ampliando el rango experimental del sistema. Además, este nuevo esquema simplifica sustancialmente la electrónica involucrada y

mejora la confiabilidad y facilidad de implementación de estos sistemas en estos ejercicios de experimentación.

4. Para aplicaciones que requieran mayor capacidad de procesamiento y velocidad de transmisión de datos, es recomendable migrar a plataformas de desarrollo más avanzadas basadas en arquitecturas de 32 bits, como STM32, que utiliza microcontroladores ARM Cortex-M3 o M7, o ESP32, que incorpora núcleos Xtensa o RISC-V. Estas plataformas ofrecen un mejor desempeño y mayor eficiencia en tareas de adquisición de datos en tiempo real.
5. Los fenómenos transitorios y el ruido en la señal $i^+(t)$ dependen, en gran medida, de inestabilidades del plasma a partir del cual se generan los haces de iones y también de las propias interacciones entre las partículas del haz.
6. La IGU se ejecuta dentro del entorno de desarrollo de MATLAB, lo cual demanda una cantidad considerable de recursos computacionales, que puede afectar el rendimiento general del computador. El uso del SITID con altas frecuencias de muestreo puede comprometer su estabilidad, ya que la interfaz debe ejecutar solicitudes de lectura del buffer de entrada con periodos muy breves entre una y otra, lo que puede provocar que el programa deje de responder.

Recomendaciones

Se incluyen algunas recomendaciones dirigidas a quien desee profundizar en el estudio de sistemas similares de adquisición de datos con el propósito de ampliar sus capacidades y optimizar su rendimiento en el contexto del estudio y la caracterización de haces de iones, o de explorar su implementación en otras potenciales aplicaciones que admitan soluciones tecnológicas sencillas como esta.

1. Dado que, entre los elementos que componen el hardware del SITID, el computador personal es el que posee una capacidad de procesamiento extensamente superior, se propone implementar un protocolo de recepción de datos más sofisticado que permita cuantificar la latencia del canal y el desfase temporal entre cada uno de los datos de la cuádrupla $\langle t_v, v(t_v), t_i, i^+(t_i) \rangle$ (diferente al desfase temporal inherente al propio ciclo de adquisición de datos realizado por el microcontrolador). Esto, con el fin de obtener información técnica sobre el canal de comunicación inalámbrico establecido por medio del módulo HC-05.

2. Desarrollar un software dedicado exclusivamente a gestionar los procesos relacionados con las funciones del SITID para poder aprovechar mejor los recursos computacionales de que disponga el computador.

Referencias

- [1] Arduino. (2018, 5 de febrero). *What is Arduino?* Arduino. <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>.
- [2] Arduino. (2024, 15 de mayo). *Language Reference*. Arduino. <https://docs.arduino.cc/language-reference/>.
- [3] Bellan, P. M. (2006). *Fundamentals of Plasma Physics*. Cambridge University Press.
- [4] Boyd, T. J. M. y Sanderson, J. J. (2003). *The Physics of Plasmas*. Cambridge University Press.
- [5] Chauvin, N. (2013). *Space-Charge Effects*. En Bailey R., *Ion Sources* (pp. 63-83). <https://cds.cern.ch/record/1445287>.
- [6] MCI Electronics. *¿Qué es Arduino?* Arduino Chile <https://arduino.cl/que-es-arduino/>.
- [7] Encyclopaedia Britannica, Inc. (2019, 8 de agosto). *Electronic work function*. <https://www.britannica.com/print/article/183895>.
- [8] Frenzel, L. (2024, 12 de noviembre). *What's The Difference Between Bit Rate And Baud Rate?*. Electronic Design. <https://www.electronicdesign.com/difference-between-bit-rate-and-baud-rate>.
- [9] García, M., Maury, G. H. I. y Hernández, A. (2019). Diseño de una fuente de iones por medio de un reactor de plasma. *Ingenierías*, 22(84), 56-65.
- [10] Red Hat. (2023, 31 de julio). *¿Qué es y para qué sirve un IDE?* Red Hat. <https://www.redhat.com/es/topics/middleware/what-is-ide>.
- [11] Howard, J. (2002). *Introduction to Plasma Physics. C17 Lecture Notes*. <https://people.physics.anu.edu.au/jnh112/AIIM/c17/>.

- [12] Humphries, S, Jr. (2002). *Charged Particle Beams* (Publicado originalmente en 1990 por John Wiley and Sons). Field Precision.
- [13] Kurose, J. F. y Ross, K. W. (2022). *Computer Networking: A Top-Down Approach* (8th Edition). Pearson. Global Edition.
- [14] MathWorks. *MATLAB. Visión general.* MathWorks. <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>.
- [15] Moler, C. (2018). *A Brief History of MATLAB.* MathWorks. <https://la.mathworks.com/company/technical-articles/a-brief-history-of-matlab.html>.
- [16] Parada Becerra, F. F. (2024). *Elaboración y estudio de recubrimientos modulados de alta adhesión por flujos plásmicos* [Tesis de doctorado, Universidad Industrial de Santander]. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/42632>.
- [17] J. M. Ruiz Gutiérrez. *Arduino: Manual de programación.* Adaptación de *Arduino Notebook: A Beginner's Reference* (2007), de Brian W. Evans. Creative Commons.
- [18] Scrivens, R. (2013). *Requirements for Ion Sources.* En Bailey R., *Ion Sources* (pp. 1-8). <https://cds.cern.ch/record/1445287>.
- [19] Siebeneicher, H. (2024, 9 de abril). *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (UART).* Arduino. <https://docs.arduino.cc/learn/communication/uart/>.
- [20] The Bluetooth SIG. *Bluetooth technology overview.* Bluetooth® Thecnology Website. <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/tech-overview/>.
- [21] IEEE Computer Society. (2020). *IEEE Standard for Information Technology—Telecommunications and Information Exchange between Systems Local and Metropolitan Area Networks— Specific Requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications.* Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE.
- [22] ITead Studio. (2010). *HC-05: Bluetooth to Serial Port Module.*
- [23] TELCOM. (2023, 21 de septiembre). *Emisión secundaria de electrones: ¿Qué es?* <https://telcomplus.org/emision-secundaria/>.
- [24] Zhurin, V. V. (2012). *Industrial Ion Sources. Broadbeam Gridless Ion Source Technology.* Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

- [25] Álvarez Carulla, A. (2020). *MASB (Arduino) - Comunicación serie I*. Creative Commons.
<https://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/197250/1/MASB>