

***“CONTROL DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA PARA EL
DESARROLLO DE NUEVAS ALEACIONES DE APLICACIÓN
NUCLEAR”***

***CARRERA: ESPECIALIZACIÓN EN REACTORES
NUCLEARES Y SU CICLO DE COMBUSTIBLE***

Alumna: ROMERO, María Celeste
Director: FELICIONI, Flavia
Co-director: CARTELLI, Carlos

Diciembre 2024



Índice

Resumen	2
Abstract	2
1 Capítulo 1. Introducción.	4
1.1 Introducción	4
1.2 Antecedentes	5
1.3 Justificación	5
1.4 Objetivo	6
1.5 Organización del trabajo	6
2 Capítulo 2. Propósito y equipamiento.	7
2.1 Nueva aleación para la industria nuclear	7
2.2 Caracterización del horno	7
2.3 Equipos e instrumental	14
3 Capítulo 3. Modelado y simulación.	15
3.1 Introducción Matlab/Simulink	15
3.2 Modelo y simulación	16
3.2.1 Simulación con electrodo de Resistencia constante	18
3.2.2 Modelado de consumo de electrodo consumible - Resistencia variable	21
3.2.3 Simulación con electrodo consumible (Resistencia variable) y ajuste para corriente constante	22
3.2.4 Breve resumen de las simulaciones	24
4 Capítulo 4. Sistema de adquisición de datos y ensayos.	25
4.1 Sistema de adquisición de datos	25
4.2 Ensayos placa ESP-32 con electrodo	29
4.2.1 Primer ensayo	29
4.2.2 Segundo ensayo	32
5 Capítulo 5. Conclusiones.	39
6 Referencias Bibliográficas	40
7 Anexos	41
7.1 Anexo 1. Cálculo de ángulo alpha.	41
7.2 Anexo 2. Código ARDUINO	42
7.2.1 Placa tensión y corriente	42
7.2.2 Placa potenciómetro	47
7.2.3 Placa receptora	51

Resumen

En la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), un grupo de la Gerencia de materiales está experimentando el desarrollo de nuevas aleaciones para la industria nuclear. Para eso cuentan con un horno de fundición por arco eléctrico en el que el electrodo consumible se funde, buscando obtener un lingote más homogéneo que el electrodo original. El arco eléctrico se produce con una fuente de alta corriente (soldadora comercial Lincoln) que puede controlar algunos parámetros.

El proceso de fundición actualmente requiere una gran intervención manual, con parámetros operativos (niveles de corriente, tensión y velocidad de consumo del electrodo) muy poco conocidos por la aparente dependencia de las características del material a fundir (forma, aleación y tamaño). Como el objetivo es obtener la aleación por un proceso automático o semiautomático repetible, se requiere avanzar en el conocimiento de dicho proceso de fundición.

Para ello, este trabajo propuso inicialmente analizar, modelar y simular las características del circuito de potencia, compuesto por la fuente de alta corriente y el electrodo consumible. Luego, se compararon los resultados de las simulaciones con mediciones sobre el sistema real, verificando la validez del modelo y las simplificaciones asumidas.

Por otro lado, se desarrolló, implementó y utilizó un sistema de adquisición ad-hoc de los parámetros operativos, destinado a registrar los ensayos y avanzar en el conocimiento del proceso de fundición real. La complejidad de este sistema se fundamenta en las clásicas dificultades para obtener mediciones en un sistema de altas corrientes: imperiosa necesidad de inmunidad al ruido eléctrico. El trabajo muestra los resultados de los primeros ensayos adquiridos con el sistema implementado, las sucesivas correcciones en el diseño y el aporte al conocimiento de los parámetros de la fundición para seguir avanzando en la automatización del proceso.

Abstract

At the Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), a materials management team is experimenting with the development of new alloys for the nuclear industry. For this purpose, they have an electric arc melting furnace in which the consumable electrode melts, aiming to obtain a more homogeneous ingot than the original electrode. The electric arc is produced by a high-current source (commercial Lincoln welder) that can control some parameters.

The melting process currently requires significant manual intervention, with operational parameters (current levels, voltage, and electrode consumption rate) being poorly understood due to their apparent dependence on the material characteristics being melted (shape, alloy, and size). Since the goal is to achieve the alloy through a repeatable automatic or semi-automatic process, there is a need to advance the understanding of the melting process.

To this end, this work initially proposed to analyze, model, and simulate the characteristics of the power circuit, consisting of the high-current source and the consumable electrode. Then, the results of the simulations were compared with measurements from the real system, verifying the validity of the model and the assumptions made.

On the other hand, an ad-hoc data acquisition system was developed, implemented, and used to record the tests and further the understanding of the actual melting process. The complexity of this system is based on the classic difficulties of obtaining measurements in a high-current system: the imperative need for immunity to electrical noise. The work presents the results of the first tests acquired with the implemented system, the successive corrections in the design, and the contribution to the understanding of the melting parameters in order to continue advancing in the automation of the process.

1 Capítulo 1. Introducción.

1.1 Introducción

En los últimos años, los avances significativos en dispositivos electrónicos, computadoras y controladores de alto rendimiento han permitido una expansión generalizada de la electrónica de potencia en diversas áreas tecnológicas. Esta expansión abarca aplicaciones como la generación y transmisión de energía eléctrica, el control de sistemas de movimiento con motores eléctricos, la optimización del consumo energético en equipos domésticos y el desarrollo eficiente de máquinas de soldar.

En la actualidad, en la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), se emplean varios tipos de hornos de fundición, entre ellos los de fundición por arco eléctrico y los de inducción. Dependiendo del tipo de horno, los requisitos para la fuente de electrónica de potencia varían considerablemente.

Por ejemplo, en el caso de los hornos de tensión de arco, la fuente es similar a las máquinas soldadoras de arco en donde se debe rectificar la tensión alterna de alimentación y controlar la potencia media entregada por el arco al electrodo. En cambio, en los hornos de inducción, se requiere una etapa de rectificación seguida de otra que permita invertir la tensión continua en una alterna controlada de alta frecuencia, generándose un campo magnético que induce corrientes eléctricas en el material a calentar. Estas corrientes eléctricas generan calor, lo que permite elevar la temperatura del metal de manera eficiente y controlada [1].

Un grupo de la Gerencia de materiales está investigando y experimentando el desarrollo de nuevas aleaciones de circonio modificadas con tantalio (Ta), por su baja sección de absorción de neutrones térmicos, lo que las hace adecuadas para su uso en reactores nucleares convencionales, utilizando un horno de fundición para arco eléctrico donde el arco es obtenido desde una fuente de alta corriente implementada con una soldadora comercial Lincoln. Resultados preliminares prometedores [2] [3] motivan a producir un lingote de esta aleación, lo que requiere un conocimiento detallado y análisis del proceso de fundición, incluyendo la medición de variables como la tensión, la corriente eléctrica y la distancia entre el crisol y la punta del electrodo.

El funcionamiento del horno es una tarea intrincada que requiere una serie de acciones específicas por parte del operario. Esta operación, caracterizada por su complejidad, demanda habilidades especializadas para su ejecución eficiente. En este contexto, es imperativo buscar mecanismos que faciliten ésta tarea, no solo para mejorar la productividad y lograr trabajos a mayores escalas sino también para proteger la salud y seguridad del trabajador.

Por eso, se plantea obtener la aleación por un proceso automático o semiautomático repetible. Una primera idea es implementar un lazo de control externo que, a través de un servomotor, controle la posición del electrodo para mantener la distancia del arco y establecer la corriente y tensión adecuada para el proceso.

Este conocimiento profundo del proceso, obtenido a través de ensayos, mediciones y registros detallados, permitiría adecuarlo a las nuevas exigencias productivas, como así también controlar y automatizar parámetros.

En este trabajo, se propone abordar estas aplicaciones desde una perspectiva centrada en el control de la electrónica de potencia, utilizando simulaciones en el entorno Matlab/Simulink. Estas simulaciones permitirán validar las evoluciones esperadas de variables críticas como tensiones y corrientes, así como explorar el funcionamiento completo del sistema para identificar posibles problemas y determinar parámetros óptimos para el ajuste final del control externo. Para ello, se propone inicialmente analizar, modelar y simular las características del circuito de potencia, compuesto por la fuente de alta corriente y el electrodo consumible. Luego, se comparan los resultados de las simulaciones con mediciones sobre el sistema real, verificando la validez del modelo y las simplificaciones asumidas.

Además, se plantea el desarrollo, implementación y utilización de un sistema de adquisición de datos ad-hoc para el horno de arco eléctrico utilizado en la fundición de diferentes aleaciones, para registrar y avanzar en el conocimiento del proceso de fundición a través de múltiples ensayos para seguir avanzando en la automatización del proceso.

1.2 Antecedentes

En el ámbito comercial, existen diversas opciones de soldadoras que incorporan tecnologías avanzadas de electrónica de potencia para mejorar la eficiencia y precisión del proceso de soldadura. Por ejemplo, las soldadoras MIG (Metal Inert Gas) automáticas ofrecen características de control sofisticadas que permiten ajustar automáticamente la corriente y la velocidad de alimentación del alambre en función del tipo de material y las condiciones de soldadura. Estas máquinas también pueden incluir sistemas de detección de arco y funciones de autodiagnóstico para optimizar la calidad de la soldadura y minimizar los tiempos de inactividad. Por otro lado, las soldadoras TIG (Tungsten Inert Gas) avanzadas pueden integrar tecnologías de control de arco que permiten una estabilidad y control excepcionales durante el proceso de soldadura. Estas máquinas suelen ofrecer modos de operación especializados para diferentes tipos de metales y espesores, así como funciones de precalentamiento y post-flujo de gas para mejorar la integridad de la soldadura y reducir la formación de porosidad.

En cuanto a los hornos automatizados, hay una tendencia creciente hacia la integración de sistemas de control que permitan una operación más eficiente y precisa. Están equipados con sistemas de control que permiten ajustar la frecuencia y la potencia de salida para adaptarse a diferentes tipos de materiales y geometrías. Estos, pueden ser programados para seguir perfiles de calentamiento específicos y optimizar la eficiencia energética del proceso de fundición.

Aunque existen equipos comerciales que incorporan este tipo de lazo externo de control, se requiere adaptarlos a las escalas de corriente específicas y ajustar el control final según las condiciones variables del proceso de fundición, que además depende del tipo de aleación en que se esté trabajando.

1.3 Justificación

El presente trabajo se enmarca dentro del contexto de la asistencia y colaboración de un proyecto de desarrollo de aleaciones nucleares, dirigido por la Gerencia de materiales. Cuenta con la participación activa del departamento

de Ingeniería de Reactores y Centrales, cuyo propósito es colaborar en la instrumentación y control automático del horno de fundición.

1.4 Objetivo

Desarrollar e implementar un sistema de adquisición de datos para la automatización de un horno de arco eléctrico utilizado para la fundición de distintas aleaciones de circonio de aplicación nuclear comparándolo con simulaciones en el ambiente Matlab/Simulink que incluyan tanto la electrónica de potencia de estas aplicaciones como los algoritmos de control.

1.5 Organización del trabajo

En el capítulo 2 se presentan las características de la nueva aleación nuclear y el horno de fundición por arco eléctrico donde se pretende obtener dicha aleación. En el capítulo 3 se introduce al ambiente MATLAB/Simulink y se muestran los modelos y simulaciones correspondientes al puente trifásico de tiristores y el electrodo consumible (modelado como resistencia variable). Luego, en el capítulo 4 se desarrolla, implementa y utiliza el sistema de adquisición de datos en dos ensayos realizados mostrando los resultados. Y por último, en el capítulo 5, se exponen las conclusiones y perspectivas al futuro.

2 Capítulo 2. Propósito y equipamiento.

2.1 Nueva aleación para la industria nuclear

Las aleaciones que se utilizan en canales y elementos combustibles en reactores nucleares convencionales que generan energía a partir de la fisión de uranio mediante neutrones térmicos, tienen una baja sección de absorción de neutrones térmicos.

En particular, pequeñas muestras de aleaciones base Zr - 1% Nb - modificadas con Ta [2], se fundieron en un horno de arco eléctrico con un crisol de cobre enfriado por agua bajo atmósfera de argón, evidenciando que la pequeña adición de Ta modifica la cinética de corrosión bajo el agua a alta presión y temperatura, siendo una alternativa ventajosa a la ya existente. Esta nueva aleación en otros estudios [3] mostró que disminuyendo el espesor del material se reduce la absorción de neutrones sin detrimento de la resistencia mecánica y que la pequeña adición de Ta disminuye la solubilidad de hidrógeno. Estos resultados preliminares motivaron a producir un lingote de esta nueva aleación para continuar con otros ensayos de comportamiento previos a la utilización en la fabricación de componentes nucleares.

Para lograr la producción repetible del lingote a nivel semi-industrial se debería conocer, registrar y analizar el proceso de fundición que involucra el calentamiento, la fusión y la solidificación de los metales en el horno. Esto implica agregar instrumentos para medir y controlar la evolución, por ejemplo de las siguientes variables: temperatura, tensión, corriente eléctrica que pasa por el electrodo y distancia entre el crisol y la punta del electrodo.

2.2 Caracterización del horno

El horno de fundición que se utiliza para iniciar el desarrollo de la fabricación del lingote de la nueva aleación es un recipiente construido en acero inoxidable tipo 304 cilíndrico de 54 cm de diámetro y 75 cm de profundidad. Presenta dos visores en la parte frontal un tercer visor en la cara lateral del recipiente (ver Figura 1 y Figura 2).

En el interior del horno se alberga un crisol de cobre (ver Figura 3) refrigerado por agua y un desplazador manual conectado al electrodo consumible. Este desplazador posee una manivela, haciendo que el electrodo pueda subir o bajar de manera manual, según la distancia requerida para que el arco se forme o mantenga de manera continua durante la fundición (ver Figura 4). Además y dado que es necesario mantener una presión tan baja como sea posible dentro del horno, se utilizan bombas mecánicas que posee grandes velocidades de bombeo, operando a una presión cercana al vacío (ver Figura 5).

Para llevar a cabo el proceso de fundición por arco se estima que es necesario suministrar al electrodo una corriente continua ajustable en rango 500A - 1300 A. Con este propósito, el horno está equipado con una fuente de electrónica de potencia trifásica de la marca Lincoln DC 1000 (ver Figura 6 y Figura 7) que es similar a las usadas para soldadura TIG/MIG. La fuente es de alimentación trifásica que es un sistema de tres fuentes alternas acopladas que tienen diferencia de fase entre ellas de 120°. Es fundamental en sistemas de

alta potencia y de distribución de energía debido a su mejor eficiencia respecto a la alimentación monofásica.

Internamente la fuente Lincoln rectifica la tensión alterna de alimentación mediante un puente trifásico de tiristores como se muestra en la figura extraída de su manual técnico (ver Figura 8). Además posee un lazo de control analógico que controla internamente la potencia (tensión o corriente) media entregada al electrodo según se seleccione del panel frontal el modo de corriente constante o el de tensión constante. El valor objetivo de esa tensión o corriente se ajusta con una perilla manual (ver Figura 7).

Para poder iniciar el arco eléctrico, el sistema requiere agregar a la tensión proporcionada por la fuente Lincoln una tensión de alta frecuencia y bajo voltaje que es provista por la unidad mostrada en la Figura 9.

Para operar el conjunto de fuentes se cuenta con un pedal de “hombre muerto” (ver Figura 10) que sólo permite la alimentación de la corriente ante la demanda del operador, y sólo cuando se cumplen otras condiciones de seguridad (puerta cerrada, sistemas de enfriamiento activos, vacío necesario dentro del horno, entre otros).

En el proceso de fundición por arco eléctrico y electrodo consumible, existe una complicación adicional en su operación: la distancia y la tensión/corriente entre los electrodos deben ser ajustadas durante la fundición por el operador, para mantener un arco estable y una fundición continua. Este ajuste depende de las condiciones del proceso y requiere gran pericia del operador que manipula la manivela de avance manual del electrodo (ver Figura 4).

Para facilitar esta tarea, se plantea obtener la aleación por un proceso automático o semiautomático repetible, implementando un lazo de control externo que, a través de un servomotor, controle la posición del electrodo para mantener la distancia del arco y establecer la corriente y tensión adecuada para el proceso.

- Horno de fundición

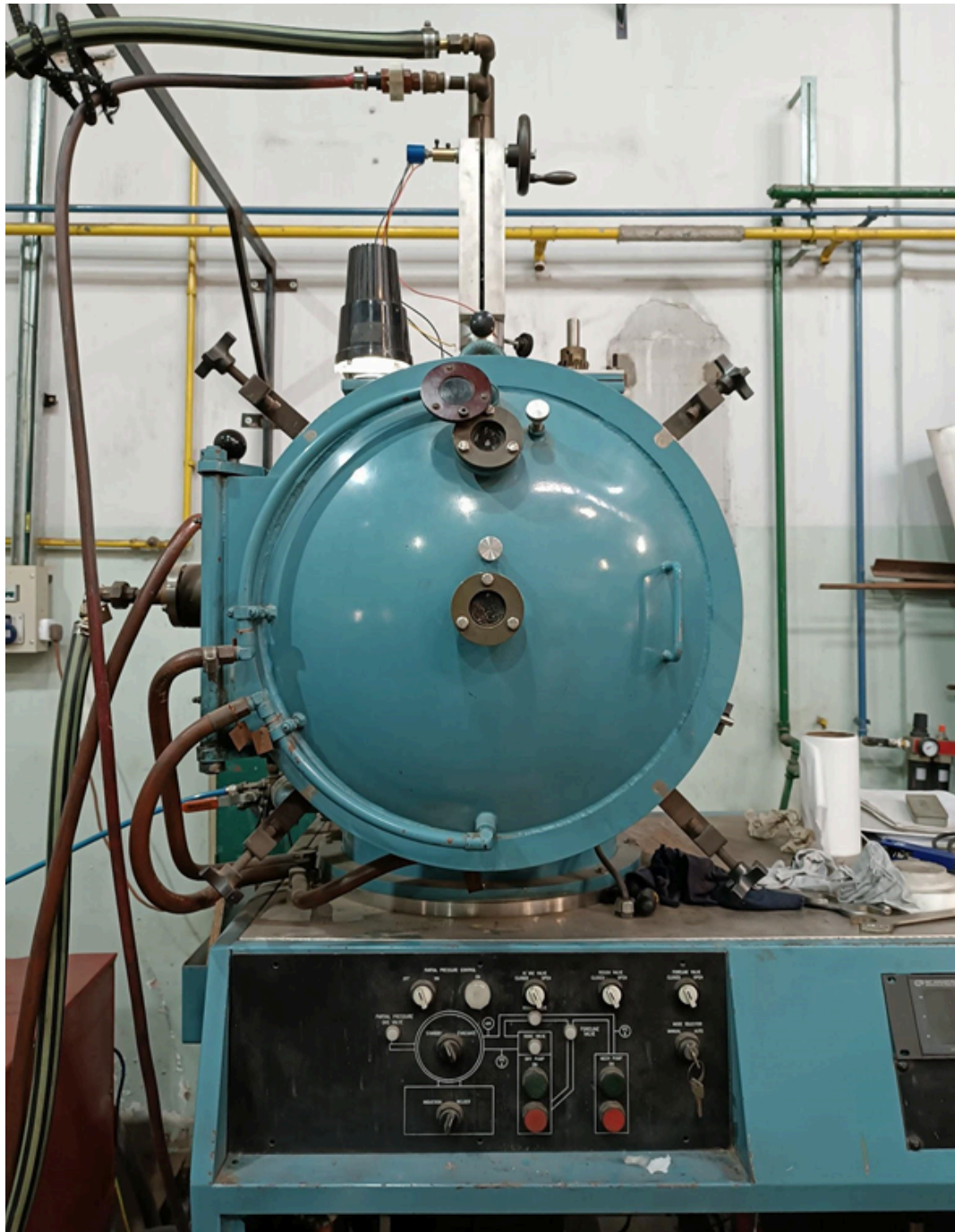


Figura 1- Vista frontal del horno de fundición por arco eléctrico, se pueden observar dos mirillas, en la parte superior el desplazador conectado al potenciómetro azul y las mangueras por donde circula el agua para refrigerar el sistema

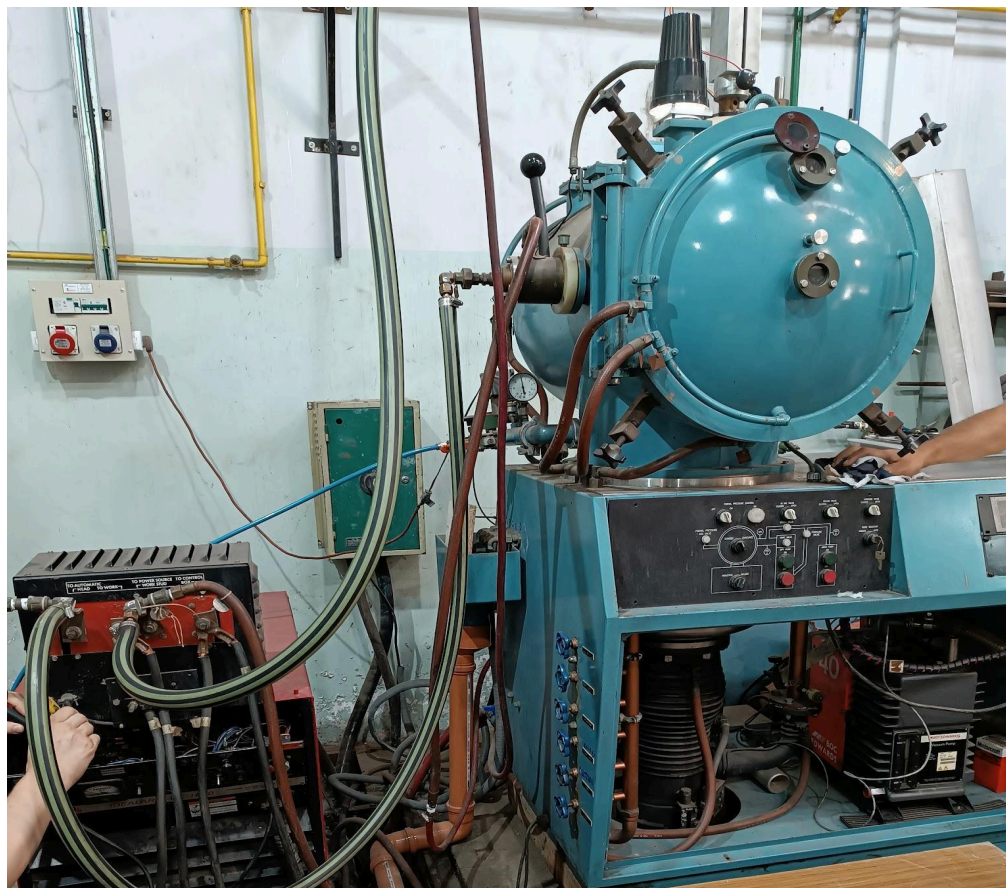


Figura 2 - Horno conectado a fuente de alta frecuencia (izquierda arriba) y fuente DC 1000 (izquierda abajo) y sistema de vacío (derecha abajo)

- Crisol de cobre

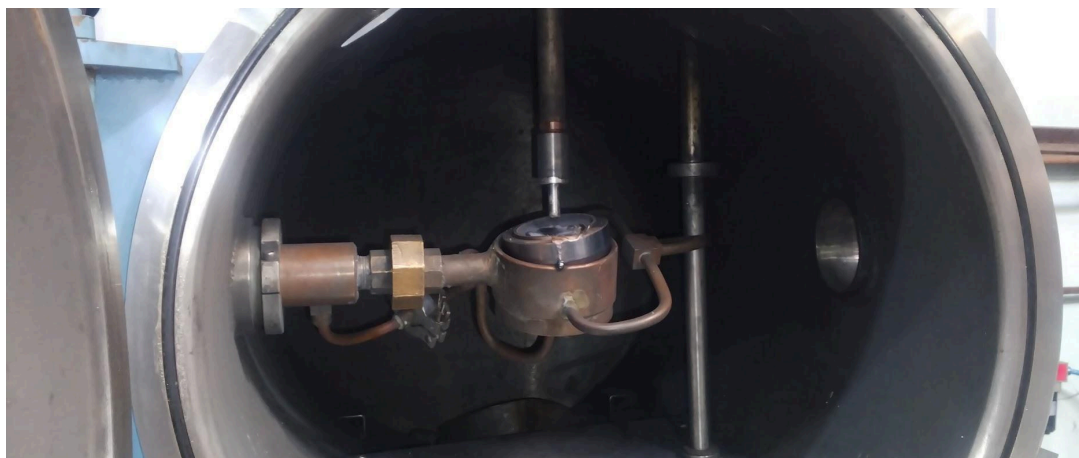


Figura 3 - Crisol de cobre refrigerado por agua.

- Desplazador



Figura 4 - Desplazador conectado al electrodo y solidario con potenciómetro

- Sistema de vacío



Figura 5 - Sistema de bombeo de vacío

- Fuente DC 1000



Figura 6 - Fuente de electrónica de potencia Lincoln DC 1000 representativa.



Figura 7- Fuente DC 1000 instalada y conectada a placa ESP 32 para adquisición de datos de tensión y corriente (cables celeste - rosa - gris, izquierda arriba)

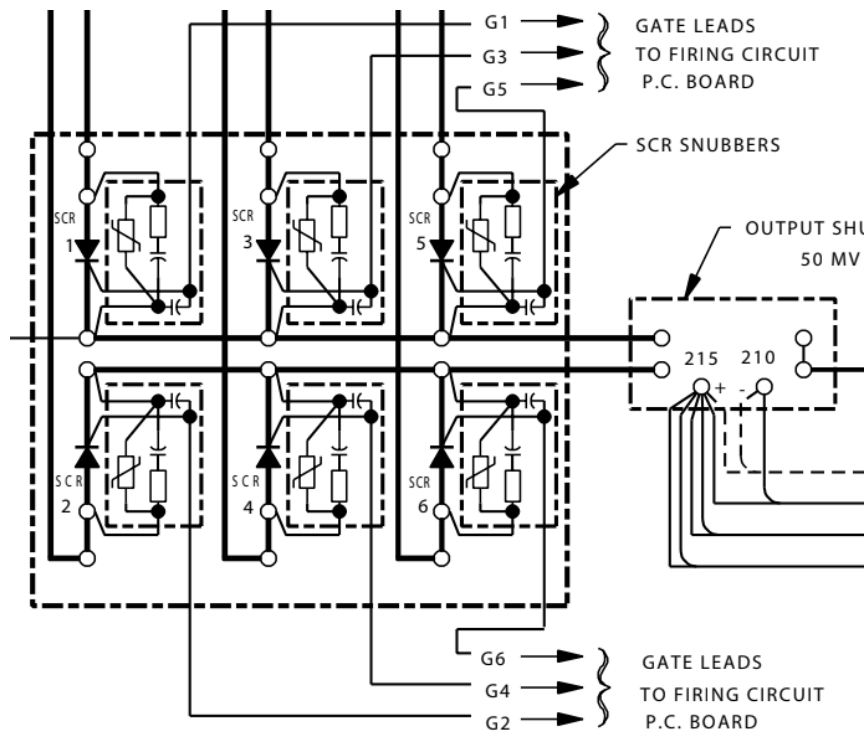


Figura 8 – Puente rectificador trifásico de onda completa a tiristores Lincoln DC1000 [4].

- Fuente alta frecuencia

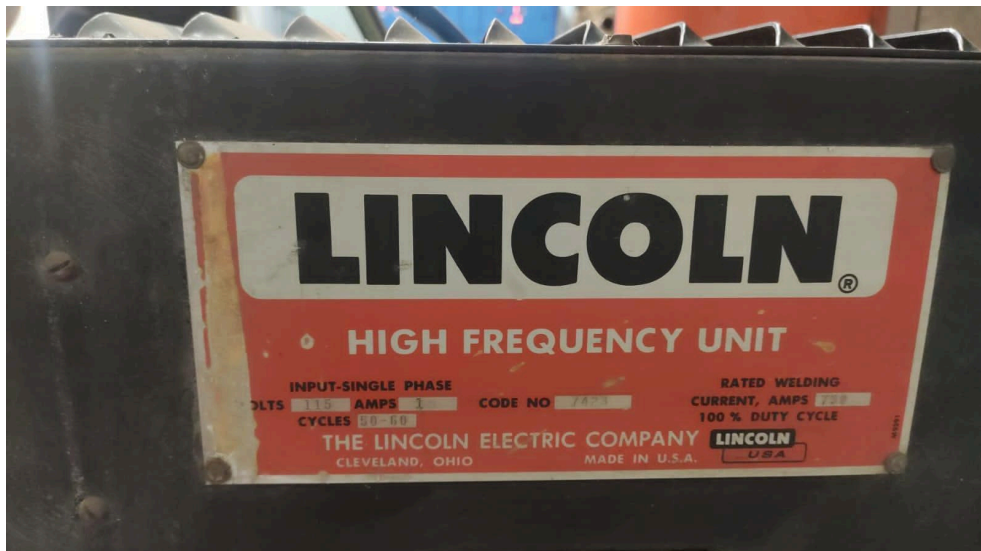


Figura 9 - Fuente de alta frecuencia Lincoln utilizada para iniciar el arco eléctrico.

- Pedal “hombre muerto”



Figura 10 - El pedal “hombre muerto” es un sistema de seguridad para asegurar que el operador está en condiciones de manipular el desplazador.

2.3 Equipos e instrumental

Durante el desarrollo se utilizaron los siguientes equipos e instrumentos:

- Osciloscopio Scopemeter Fluke 125
- Potenciómetro
- Computadora
- Placas ESP-32
- Placa adquisidora National Instrument de tensión USB-6002

3 Capítulo 3. Modelado y simulación.

3.1 Introducción Matlab/Simulink

En la actualidad, en el ámbito industrial se utilizan distintos sistemas electrónicos de control, algunos incluso con especificaciones no convencionales. Para sacar el máximo provecho de estas estructuras de control dentro de marcos y condiciones específicas de cada aplicación, la simulación juega un papel crucial, ya que permite ajustarlas a estos requisitos sin necesidad de realizar costosos ensayos de laboratorio. De esta manera, contar con simulaciones lo más precisas posibles se convierte en una herramienta esencial para reducir los costos de diseño.

Algunas de las ventajas de utilizar simulaciones en estos sistemas son las siguientes:

- En muchos sistemas de control, es necesario limitar las señales de referencia según los límites admisibles establecidos, algo que no es necesario en una simulación.
- Se pueden verificar las variaciones de variables clave, como tensiones, corrientes y flujos, que no podrían medirse fácilmente con equipos estándar.
- Ayuda a identificar posibles problemas y a determinar los parámetros de manera óptima.
- Permite analizar con detalle las respuestas ante fallos o condiciones anormales de funcionamiento.
- En el ámbito educativo, es una forma eficiente de aprender cómo se diseñan y funcionan las distintas partes que conforman un sistema de control, mostrando cómo interactúan entre sí.

MATLAB es una plataforma que ofrece un conjunto de avanzadas herramientas para el análisis y diseño de sistemas de control. Funciona tanto como un entorno interactivo como un lenguaje de programación, y presenta dos espacios de trabajo: uno basado en texto (ventana de comandos) y otro gráfico (Simulink).

Simulink es un entorno gráfico que permite modelar, simular y analizar sistemas dinámicos a través de diagramas de bloques. Ofrece una extensa librería de bloques, que incluye fuentes, sumideros, y componentes tanto lineales como no lineales, así como conectores para interrelacionarlos.

Una vez que se ha creado un modelo en Simulink, se puede simular utilizando un método de integración, el cual puede seleccionarse desde el menú de Simulink o desde la ventana de comandos de MATLAB. Al finalizar la simulación, los resultados estarán disponibles en el espacio de trabajo de MATLAB (Workspace), donde se podrán visualizar o procesar para un análisis posterior.

Una de las principales características de Simulink es que los usuarios tienen acceso directo a una amplia gama de herramientas de MATLAB para la generación, análisis y optimización de los sistemas implementados dentro de Simulink. Estas herramientas están disponibles en lo que se conoce como Toolboxes. Cada Toolbox incluye un conjunto de archivos con extensión .m (archivos m-files), diseñados para abordar tipos específicos de problemas.

En el entorno de Simulink, también se utiliza Simscape Electrical, que ofrece librerías de componentes para modelar y simular sistemas electrónicos, mecatrónicos y eléctricos (ver Figura 11). Esta herramienta resulta fundamental para el desarrollo de sistemas de control y para evaluar el rendimiento a nivel de sistema. Además, permite parametrizar modelos utilizando variables y expresiones matemáticas de MATLAB, y diseñar sistemas de control específicos para sistemas eléctricos dentro de Simulink.

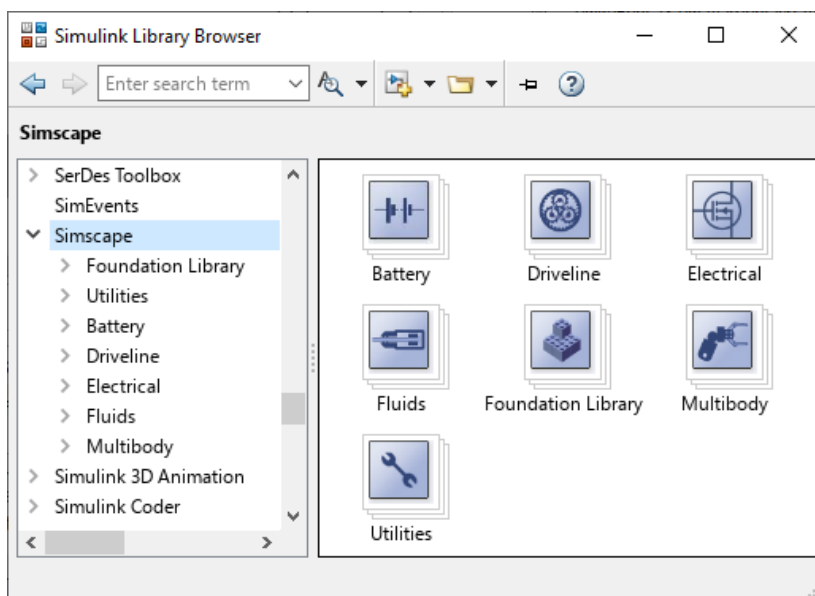


Figura 11 – Interface librería Simscape.

3.2 Modelo y simulación

Los componentes eléctricos del sistema se modelaron como se detalla a continuación:

La Fuente Lincoln DC1000 se la modeló conformada por:

- (1) fuente trifásica, que modela la salida de su transformador de aislación eléctrico interno. La salida de la fuente trifásica se muestra en Figura 12.
- (2) puente rectificador trifásico de onda completa controlado a tiristores.

(4 y 5) bloques de control (funciones del modelo) y generador de pulsos que modelan muy simplificada la placa de disparo (firing board) interna de la fuente.

Por otro lado la resistencia (3) modela el cableado y el electrodo consumible dentro del horno.

La Figura 13 muestra la conexión entre los distintos bloques.

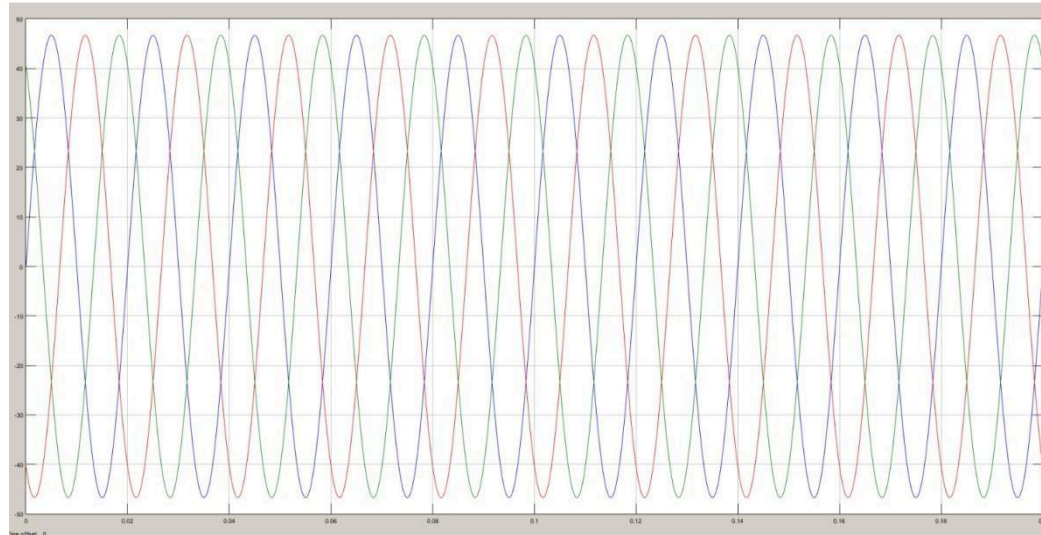


Figura 12 – Corriente trifásica.

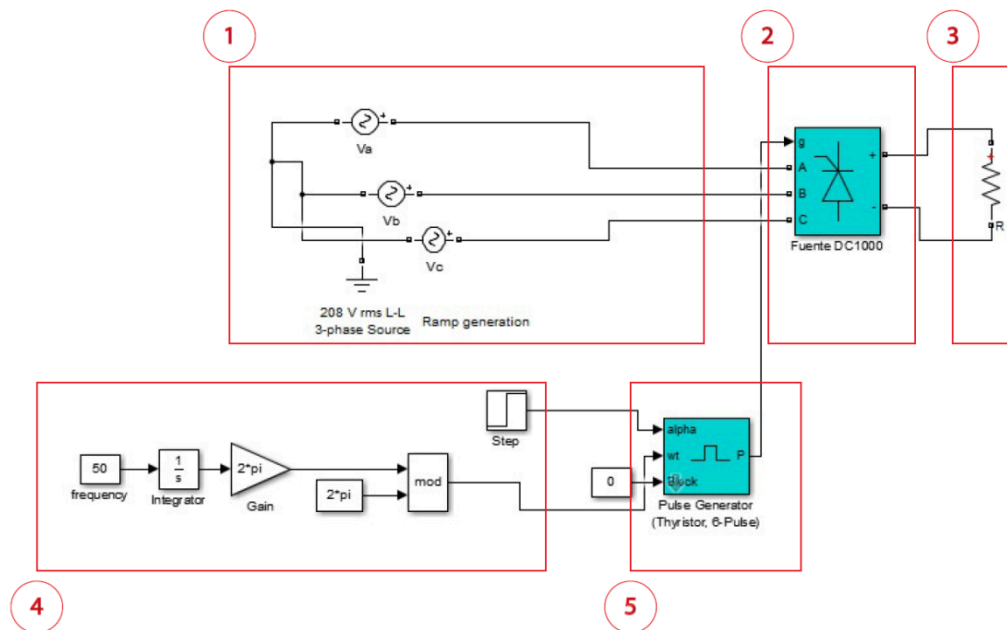


Figura 13 – Modelo del sistema. 1. Corriente trifásica – 2. Fuente DC1000 – 3. Resistencia constante – 4. Funciones del modelo – 5. Generador de pulsos.

3.2.1 Simulación con electrodo de Resistencia constante

La fuente trifásica alimenta el puente rectificador controlado trifásico de onda completa a tiristores (ver *Figura 14*), que a su vez se dispara con los pulsos obtenidos del generador de pulsos. El tiempo de disparo (ángulo de encendido α) de los tiristores se controla con los bloques de control contruidos por funciones del modelo. Para obtener cierto valor de tensión media deseada sobre una resistencia que se asume en principio constante debe calcularse el ángulo necesario de disparo (según lo presentado en [6] - ver Anexo 1), obteniéndose cambios de disparos en los tiristores (ver *Figura 15*). La *Figura 16* muestra la tensión instantánea de salida obtenida (azul) sobre la resistencia para tres valores de α diferentes, la *Figura 17* muestra además la tensión media obtenida (verde). Ese cambio en α puede asumirse que resulta de variar la perilla graduada del frente de la fuente Lincoln (ver *Figura 18*).

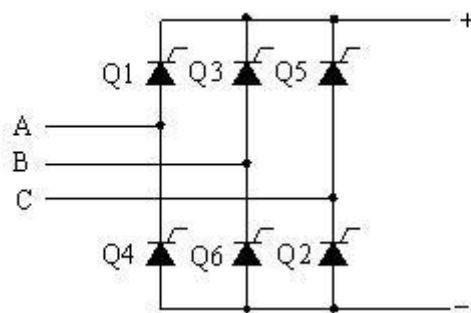


Figura 14 – Puente rectificador controlado trifásico de onda completa a tiristores

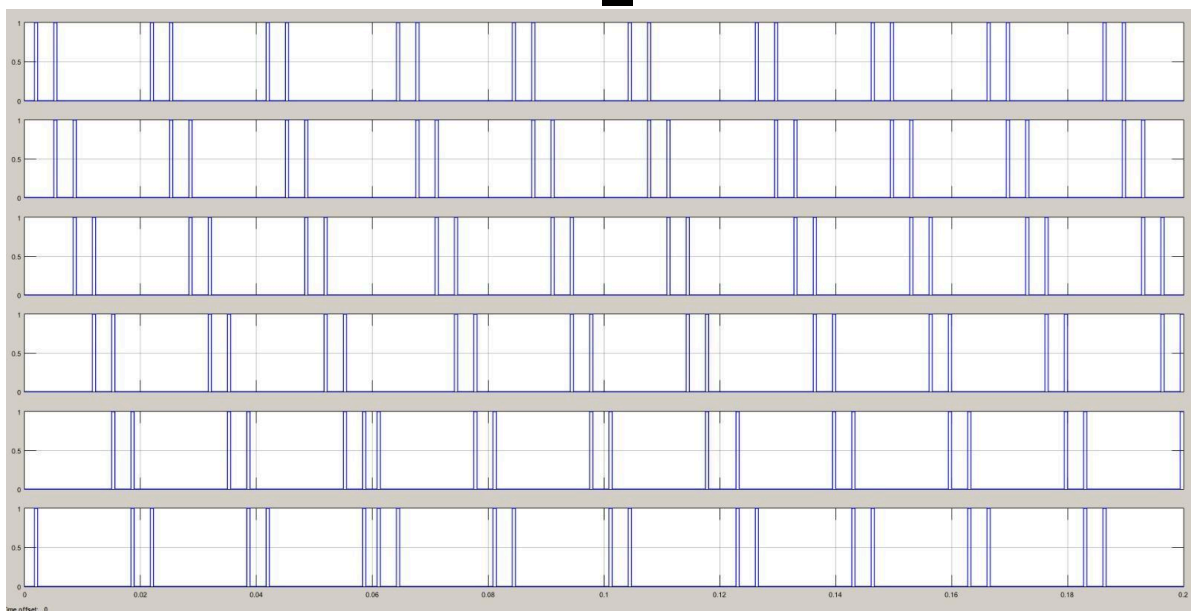


Figura 15 – Cambio de disparos en los tiristores asociados a cada una de las fases (cambios en la tensión de salida en la carga)

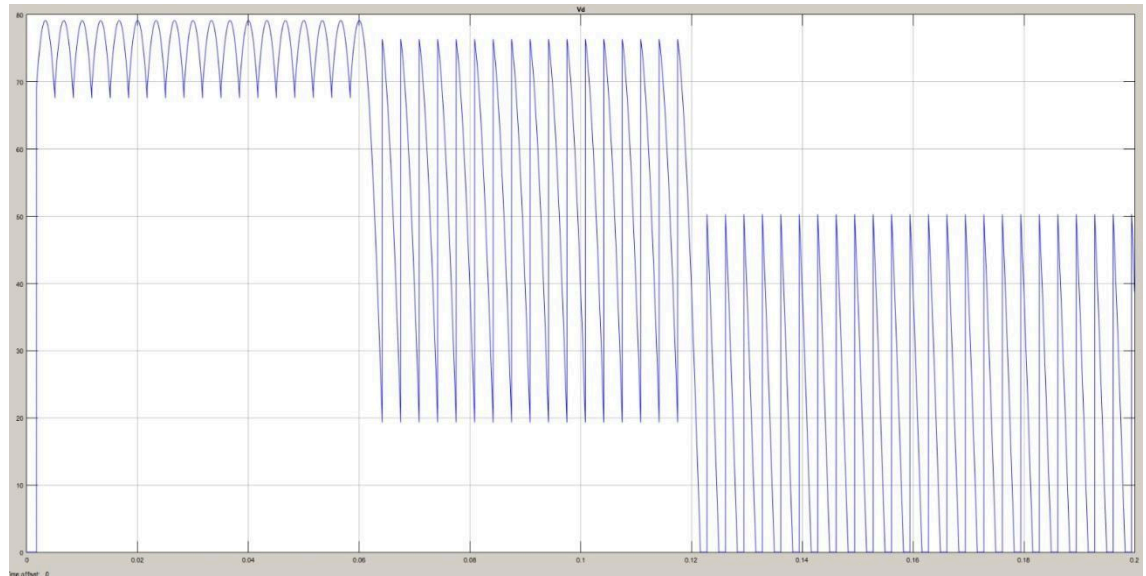


Figura 16 – Distintas tensiones relacionadas con diferentes posiciones de la perilla de la fuente DC1000.

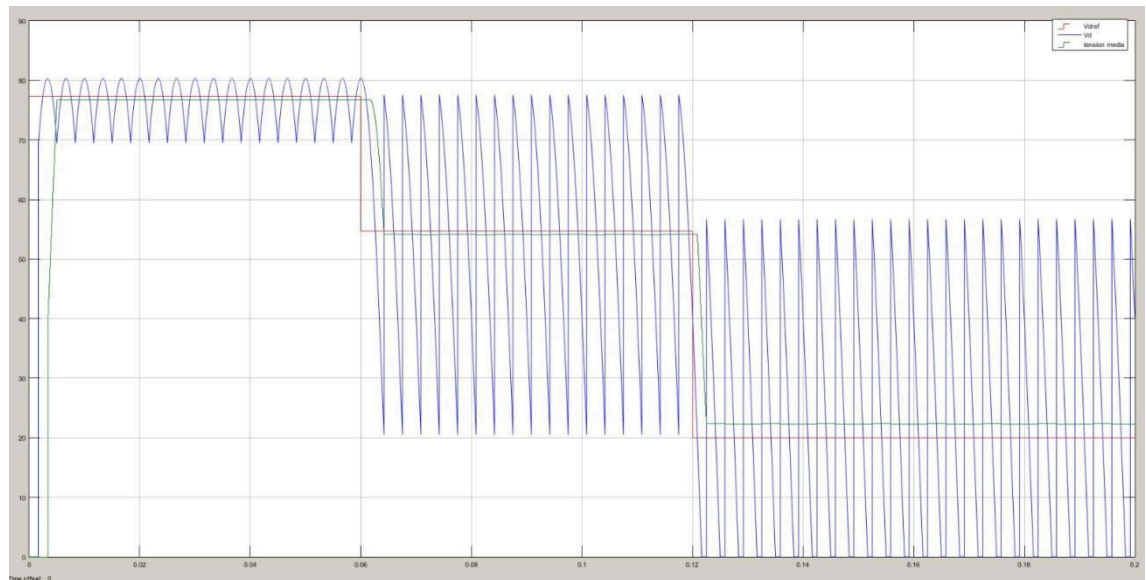


Figura 17 – Tensiones medias relacionadas con diferentes posiciones de la perilla de la fuente DC1000. Tensión de referencia (rojo), tensión media (verde) y tensión instantánea (azul)



Figura 18 – Frente de la fuente Lincoln donde se aprecian los indicadores de tensión y corriente medias y la perilla de ajuste de nivel.

Esto mismo se vio reflejado en la medición con osciloscopio de la tensión instantánea de salida en el circuito real, en el que se probaron distintas posiciones de la perilla de regulación de la fuente. En las figuras Figura 19 y Figura 20 se aprecian formas de onda, con tensiones medias que varían con el ajuste manual de la perilla en los siguientes valores: 77 V (máxima) y 67 V.

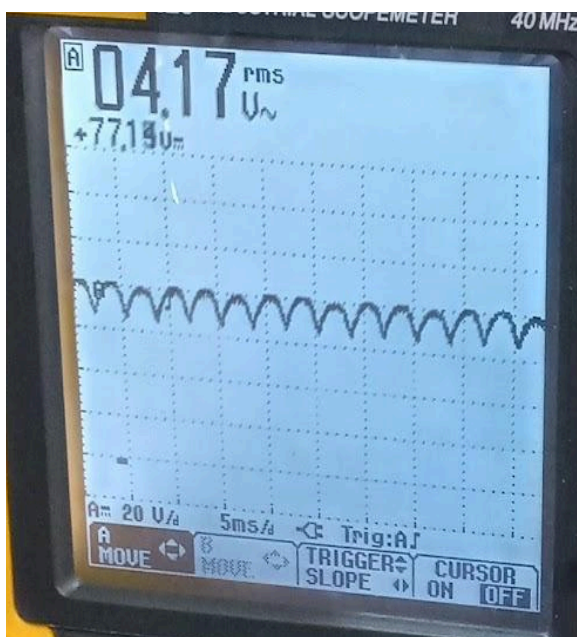


Figura 19 - Forma de onda para una tensión media de 77.14 V

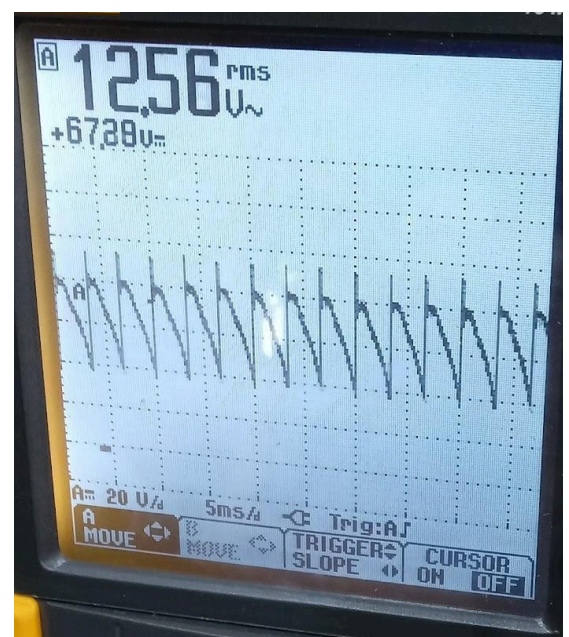


Figura 20 - Forma de onda para una tensión media de 67.29 V

Con eso se muestra que la simulación por un lado reproduce el funcionamiento del puente de tiristores real y evidencia que el cambio del ángulo de disparo modifica la tensión media de salida. Además permite reconstruir la forma de onda del ensayo real, validando el modelo de SIMULINK.

3.2.2 Modelado de consumo de electrodo consumible - Resistencia variable

Ahora se procede a modelar el electrodo consumible utilizado en la fundición como una resistencia variable de tres estados (ver Figura 21). Ese comportamiento se plantea para modelar el consumo gradual del electrodo. Al variar la resistencia en el tiempo, si se asume tensión constante, habrá entonces variación en la corriente tal como se observa en Figura 22 para una fuente de tensión constante.

Los valores de corriente resultante para las resistencias y la tensión elegida para la simulación, resultan en I1 I2 I3, calculadas como:

$$R_1 = 0,1 \, \Omega$$

$$I1 = \frac{100 \, V}{0,1 \, \Omega} = 1000 \, A$$

$$R_1 + R_2 = 0,2 \, \Omega$$

$$I2 = \frac{100 \, V}{0,2 \, \Omega} = 500 \, A$$

$$R_1 + R_2 + R_3 = 0,3 \, \Omega$$

$$I3 = \frac{100 \, V}{0,3 \, \Omega} = 333,3 \, A$$

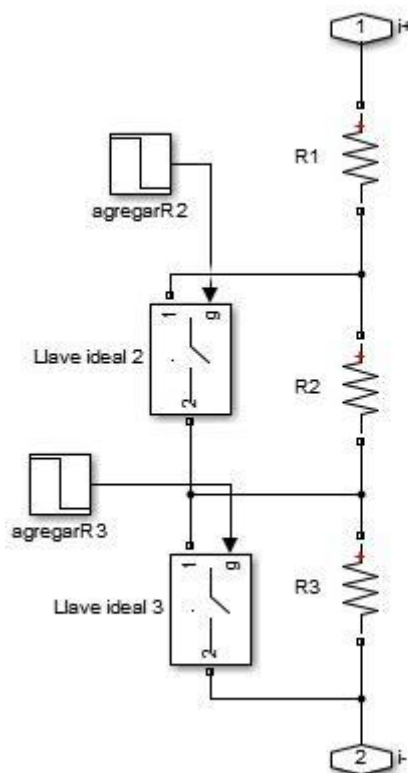


Figura 21 – Modelo de resistencia variable similar a electrodo a medida que se consume.

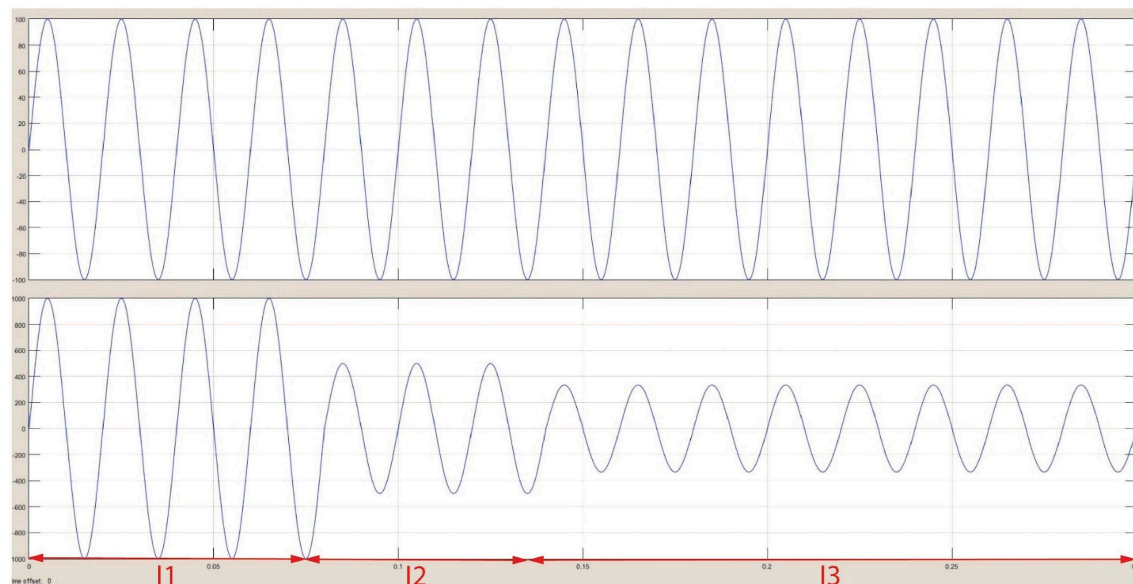


Figura 22 – Tensión constante (grafico superior) y corriente variable (grafico inferior) asociada a resistencia variable.

3.2.3 Simulación con electrodo consumible (Resistencia variable) y ajuste para corriente constante

Para modelar este caso se le agrega al modelo previo un nuevo bloque (ver *Figura 23* y *Figura 24*), llamado “Vd_ref □ alpha” que calcula el ángulo de disparo del rectificador buscando que la corriente media sea constante a medida que la resistencia aumenta. Ese aumento se asocia al consumo del electrodo y el aumento paulatino de la distancia del arco.

Los resultados de la simulación de este caso se muestran en *Figura 25* y *Figura 26*. Observar que los valores de las resistencias y corrientes asociadas al cambio de tensión media requerido coinciden con lo previsto para obtener una corriente constante en los tres pasos de variación de resistencia (consumo de electrodo):

$$R_1 = 0,1 \, \Omega$$

$$I1 = \frac{40 \, V}{0,1 \, \Omega} = 400 \, A$$

$$R_2 = 0,05 \, \Omega$$

$$I2 = \frac{60 \, V}{0,15 \, \Omega} = 400 \, A$$

$$R_2 + R_1 = 0,15 \, \Omega$$

$$R_3 = 0,025 \, \Omega$$

$$I3 = \frac{100 \, V}{0,175 \, \Omega} = 400 \, A$$

$$R_3 + R_2 + R_1 = 0,175 \, \Omega$$

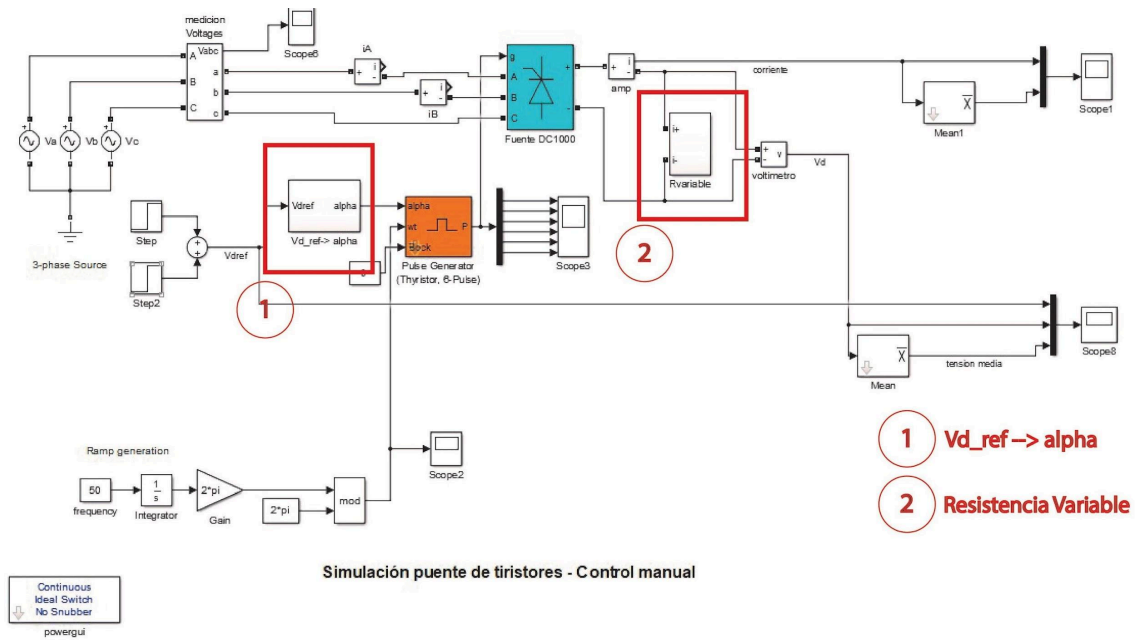


Figura 23 – Simulación puente de tiristores con Resistencia Variable



Figura 24 – Cálculo de α

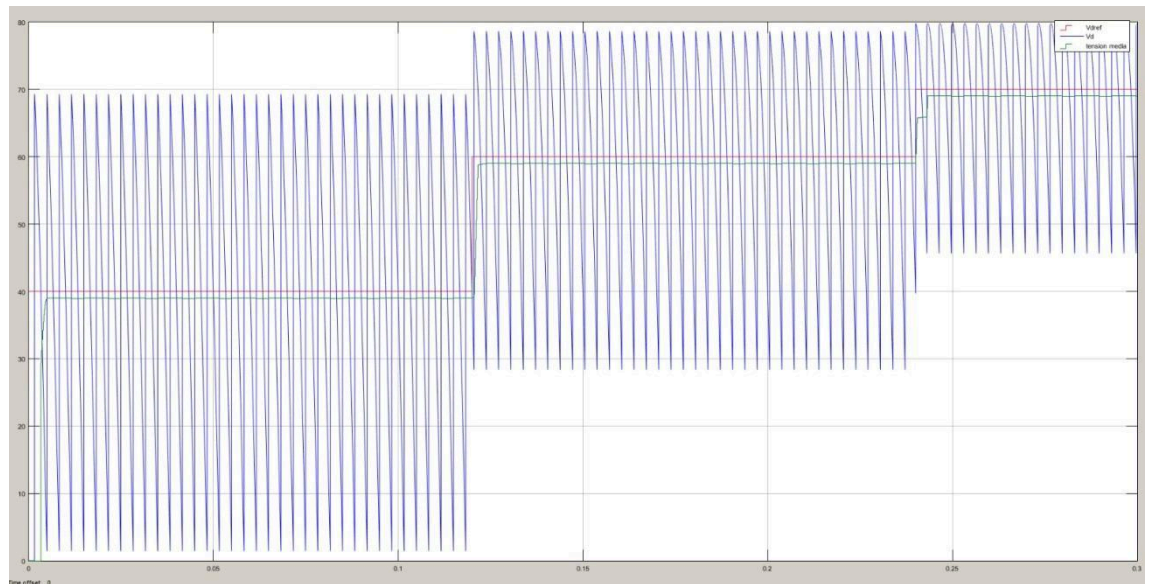


Figura 25 – Tensión de referencia (rojo), tensión media (verde) y tensión instantánea (azul)

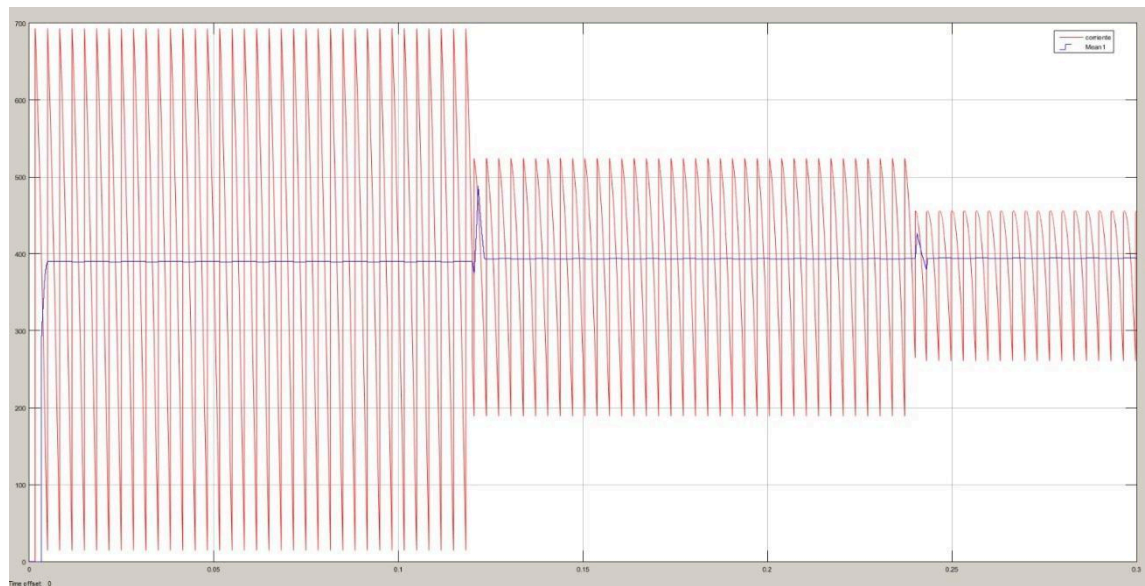


Figura 26 – Corriente instantánea (rojo) y corriente media (azul)

3.2.4 Breve resumen de las simulaciones

- Caso 3.2.1: Resultados del modelo y del osciloscopio fueron similares y eso validó el modelo simplificado de la fuente Lincoln.
- Caso 3.2.3: Del modelado el consumo del electrodo (resistencia variable) se obtendrían corrientes variables. Se muestra que se logra llevar a constante esa corriente media variando el ángulo de disparo y consecuentemente la tensión media sobre la resistencia. Dado que esta tensión tiene un límite de aprox 80V, esto evidencia la necesidad de implementar en la práctica otra alternativa: por ejemplo con el acercamiento del electrodo consumible a una velocidad tal de mantener la corriente del arco constante. Se espera que esto logre la evolución de la fundición uniforme y más posibilidades de obtener un lingote homogéneo.

Por lo tanto, del conjunto de simulaciones se infiere que el sistema de control automático para obtener un lingote homogéneo debería acercar el electrodo a medida que se consume.

4 Capítulo 4. Sistema de adquisición de datos y ensayos.

4.1 Sistema de adquisición de datos

El sistema de adquisición de datos de ensayos está formado por un:

- Módulo de adquisición y transmisión wifi (ver Figura 27)
- Módulo receptor wifi y adaptador USB (ver Figura 28)
- Módulo de adquisición USB de NI con un medidor de rotación tipo potenciómetro multivuelta (ver Figura 29)
- Software de lectura de esos datos, visualización, y almacenamiento de resultados de ensayos.

Los dos primeros ítems son desarrollos propios que centran su funcionamiento en módulos ESP-32.

Estas son una placa de desarrollo de bajo costo y alto rendimiento diseñada para aplicaciones de IoT (Internet of Things). Forma parte de la familia ESP8266, el NodeMCU ESP-32, con su potente procesador de tres núcleos, es una opción ideal para proyectos de IoT, gracias a su capacidad para establecer conexiones inalámbricas mediante Wi-Fi o Bluetooth integradas. El módulo wifi es utilizado para transmitir en forma inalámbrica los datos medidos y calculados hacia la placa receptora (ver Figura 27).

El ESP-32 representa una evolución del módulo ESP8266, abordando y mejorando diversas limitaciones y fallos de su predecesor. Para la programación del dispositivo, se pueden emplear varios Entornos de Desarrollo Integrado (IDEs), como Arduino, CodeBlocks, Netbeans, Lua, entre otros.

La aplicación para la adquisición, transmisión y recepción de datos fue programada usando en el IDE de Arduino (ver Anexo 2).

El ESP-32 contiene dos conversores analógicos - digitales (ADC) de 16-bits de tipo SAR (de aproximaciones sucesivas) con la posibilidad de medir en 18 canales.

El ADC incorporado facilita la conversión de señales analógicas a digitales, contando con 16 pines que ofrecen esta funcionalidad.

En nuestro sistema, dos de esas entradas son usadas para las mediciones de tensión de salida y corriente de salida de la fuente Lincoln.

La placa dispone de puertos de alimentación de 5V y 3.3V, así como pines de comunicación serie (GND, TX y RX), entre otros. El pin de 5V puede utilizarse para alimentar directamente el ESP-32 y sus periféricos si se dispone de una fuente de voltaje regulada. Por su parte, el pin de 3.3V, proveniente de un regulador de voltaje (CP2102), puede usarse para alimentar componentes externos.

Aquí, la alimentación del módulo de adquisición es realizada mediante un arreglo de baterías de Li-ion recargables, para independizarla del resto de la alimentación eléctrica (ver Figura 28).

Las características de la placa son las siguientes:

- CPU: Xtensa® Dual-Core LX6 de 32 bits;
- Memoria ROM: 448 KBytes;
- Reloj máximo: 240 MHz;
- Memoria RAM: 520 Kbytes;
- Memoria flash: 4 MB;
- Estándar inalámbrico 802.11 b / g / n;
- Conexión Wifi de 2.4Ghz (máximo 150 Mbps);
- Antena integrada en el tablero;
- Conector micro USB o USB-C para comunicación y alimentación;
- Wi-Fi Direct (P2P), P2P Discovery, modo P2P Group Owner y P2P Power Management;
- Modos de funcionamiento: STA / AP / STA + AP;
- Bluetooth BLE 4.2;
- Puertos GPIO: 11;
- GPIO con PWM, I2C, funciones SPI, etc.
- Voltaje de funcionamiento: 4.5 ~ 9V;

Los puertos GPIO de la placa admite una corriente de hasta 12 mA y se utilizan como entradas y salidas digitales. Además, la tarjeta cuenta con 10 sensores táctiles capacitivos que detectan el tacto y envían la información correspondiente.

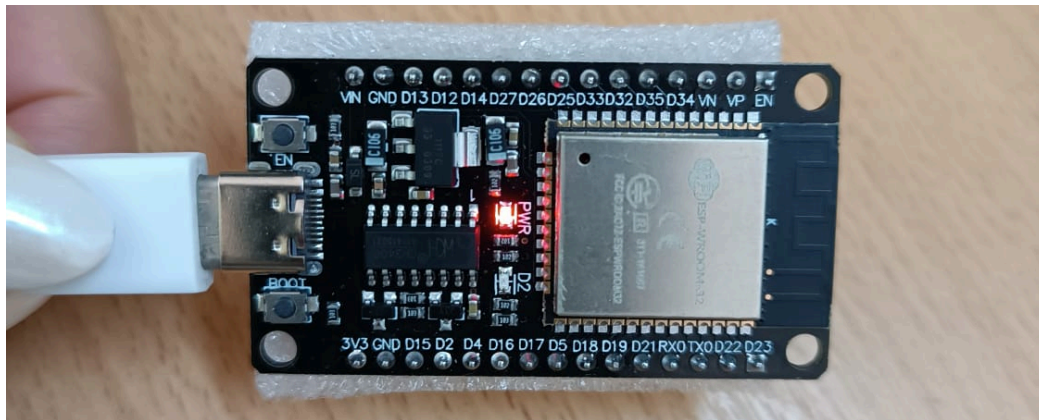


Figura 27 - Placa ESP-32 - Wi Fi receptora



Figura 28 - Placa ESP- 32 - Wi Fi adquisidora y batería.



Figura 29 - Potenciómetro - Placa National Instruments USB

Para obtener las mediciones de tensión y corriente que entrega la fuente al electrodo consumible se diseñó un circuito adaptador/acondicionador de señales que se conecta en paralelo con cada uno de los indicadores de tensión y corriente. De esta forma se mapea la tensión (V_{sold}) de rango de 0-80 V al rango de 0-3.3 V de una de las entradas analógicas de la placa ESP-32 y la corriente en la resistencia shunt del horno (I_{sold}) que excursiona entre 0 y 50 mV a otra entrada analógica de la placa ESP-32. La placa ESP-32 se programó

con el software ARDUINO para leer ambas entradas y transmitir las vía WIFI hacia otra placa ESP-32 que funciona como receptora y que se conecta a una PC por un puerto USB (COM4). En la Figura 43 se presenta un esquema simplificado de este sistema.

Además, se utilizó una placa National Instruments de tensión USB-6002 para medir la tensión en el potenciómetro acoplado a la manivela, la cual resulta proporcional al desplazamiento lineal del desplazador (ver Figura 29). Las placas USB-6002 y receptora ESP-32 se conectan a dos puertos USB de la PC.

Para el ensayo mencionado, se implementó un software en LabView que realiza la lectura de dos puertos específicos. Este software está diseñado para acondicionar y exhibir las variables que se adquieren durante el proceso. Además, tiene la capacidad de almacenar los datos recopilados cada 250 milisegundos en un archivo con extensión .tdms, el cual es nativo de LabView y compatible con Excel. Esta funcionalidad permite una integración con otras herramientas de análisis de datos, facilitando así el procesamiento y la interpretación de los resultados obtenidos en el ensayo (ver Figura 32).

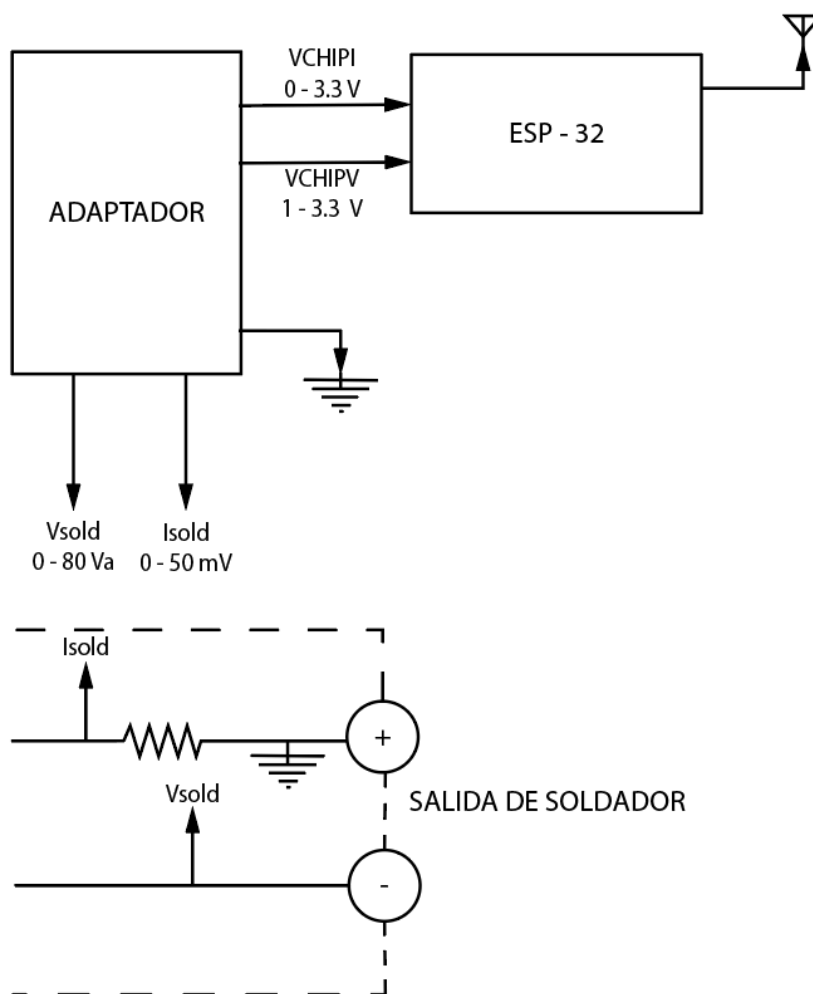


Figura 30 - Esquema del sistema de adaptación/acondicionamiento de señal, adquisición y transmisión de las mediciones de tensión y corriente de salida.

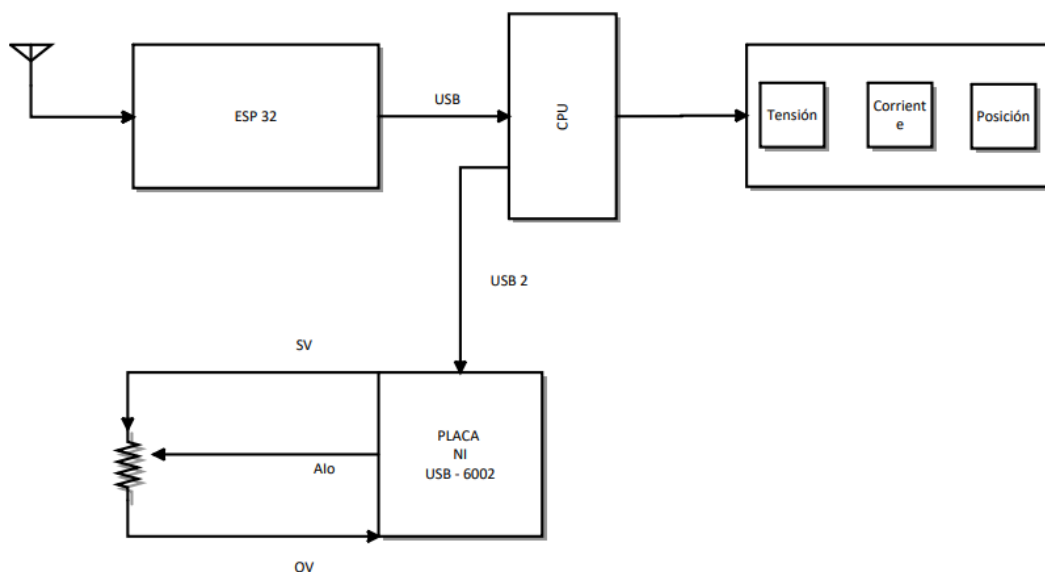


Figura 31 - Esquema de conexionado de la placa receptora ESP-32 y desde el potenciómetro a la PC de adquisición y monitoreo.

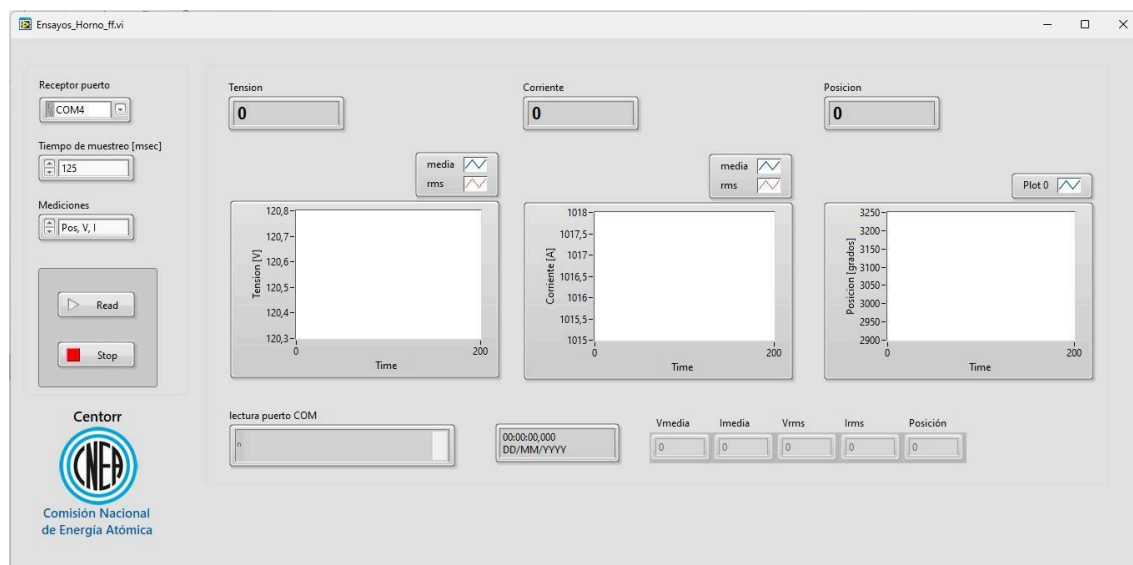


Figura 32 - Interfaz software LabView. Representación de Posición, Tensiones y Corrientes medias/eficaces en tiempo real.

4.2 Ensayos placa ESP-32 con electrodo

4.2.1 Primer ensayo

Se realizaron 3 pruebas con el fin de medir tensión, corriente y posición del electrodo consumible utilizando el circuito de adaptación/acondicionamiento de señales de tensión y corriente (ver Figura 33 y Figura 34) y el potenciómetro acoplado a la manivela (ver Figura 2).

En la primera prueba se corrió el software y se comprobó que se recibían valores de estas tres variables con todo conectado, pero con corriente y tensión nulas (etapa previa al inicio de la fundición). En el momento que se comenzó a fundir el electrodo (con la aparición de corriente) el software se interrumpió por error en la adquisición de las mediciones.

Se tuvieron en cuenta varias hipótesis entre ellas que el USB proveniente del circuito del potenciómetro agregaba demasiado ruido, saturando el sistema.



Figura 33 - Set up completo instalado en fuente DC 1000 y horno.

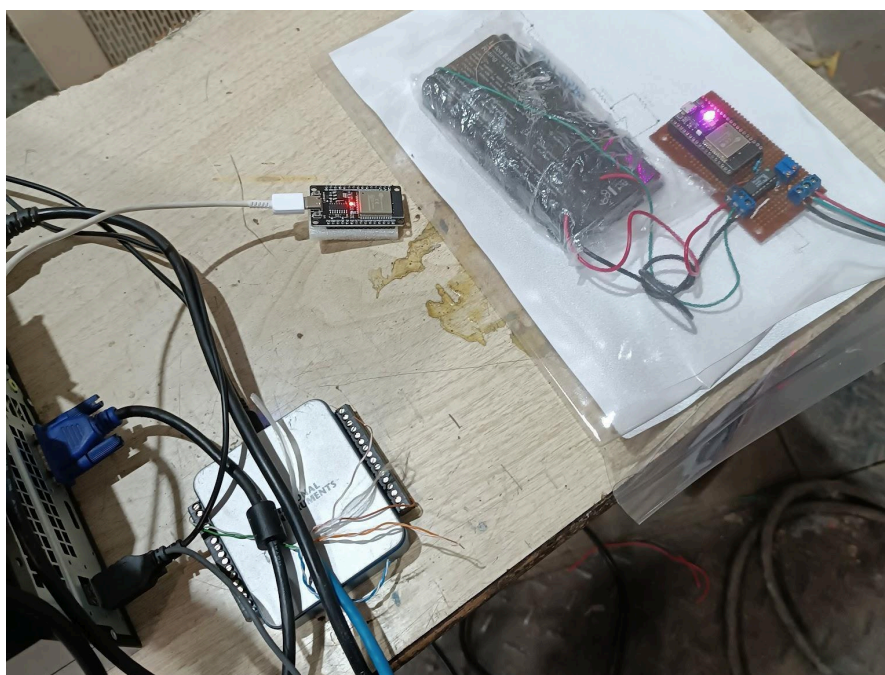


Figura 34 - Set up de sistema de adquisición de datos.

En la segunda y tercera prueba se desconectó este sistema, obteniéndose con éxito mediciones de tensión y corriente. Se pueden observar distintos intervalos con tensión nula, esto se debe a que en esos momentos no se estaba realizando fundición. Además, los distintos picos son provocados por distintos procesos como interferencia o inconvenientes con la fundición del electrodo.

En cuanto, el 2da prueba con el primer electrodo, la tensión media varía entre 20 y 30 V en (ver Figura 35) y los valores de corriente media varían entre 600 y 800 A en un tiempo de 15 s (ver Figura 36).

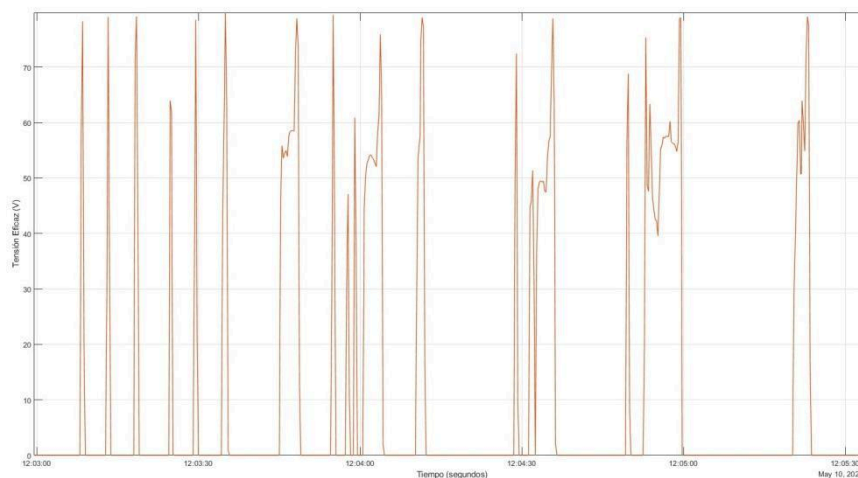


Figura 35 - Desarrollo de la tensión durante la prueba con el primer electrodo.

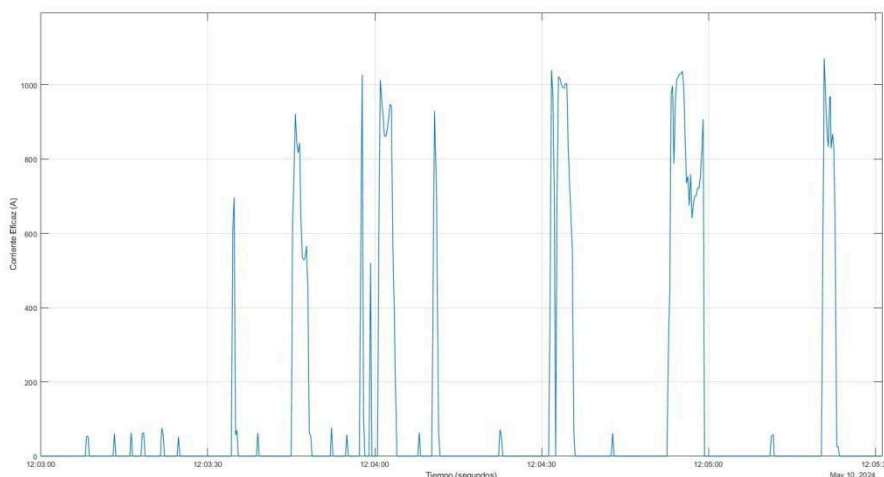


Figura 36 - Desarrollo de la corriente durante la prueba con el primer electrodo.

Luego, en la 3era prueba con el segundo electrodo, la tensión media varía entre 20 y 30 V (ver Figura 37), y la tensión media varía entre 600 y 700 A (ver Figura 38), la mitad del electrodo se fundió en 30 s, se rompe el arco eléctrico (tensión nula) y la otra mitad en 20 s aproximadamente.

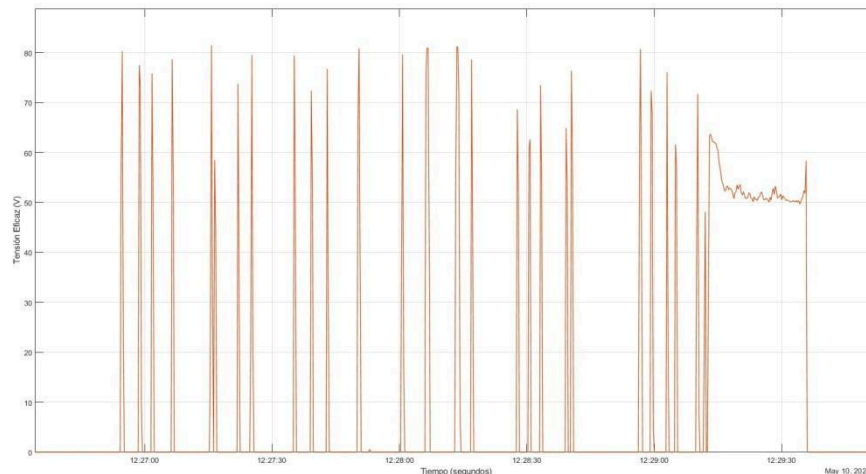


Figura 37 - Evolución de la tensión durante la prueba con el segundo electrodo.

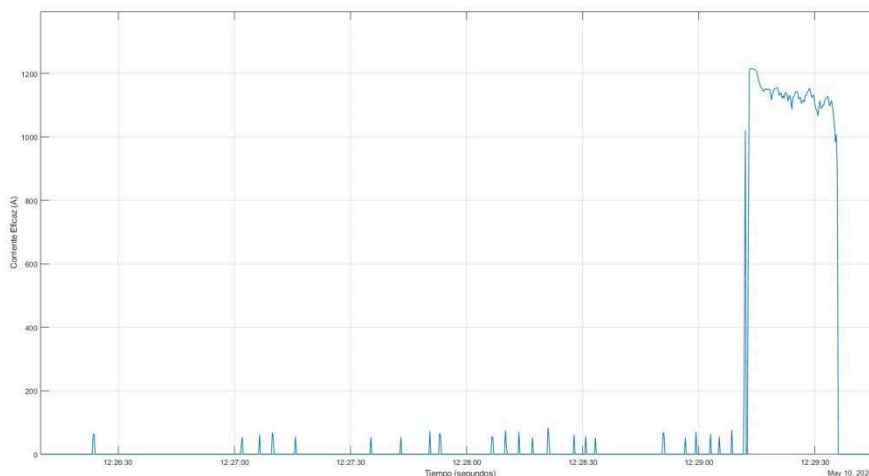


Figura 38 - Evolución de la corriente durante la prueba con el segundo electrodo.

Los resultados obtenidos permitieron observar ciertas características del proceso de fundición y evidenciaron que la medición del potenciómetro no fue funcional. Para avanzar en los ensayos se diseñó una nueva alternativa de medición de posición del electrodo, cuyas pruebas se describen a continuación.

4.2.2 Segundo ensayo

Se realizaron 2 pruebas con el fin de medir tensión, corriente y posición del electrodo consumible utilizando el nuevo circuito de adaptación/acondicionamiento de señales de tensión y corriente (ver Figura 39 y Figura 40) y el potenciómetro acoplado a la manivela (ver Figura 41, Figura 42 y Figura 43).



Figura 39 – Nuevo Módulo receptor wifi y adaptador USB.

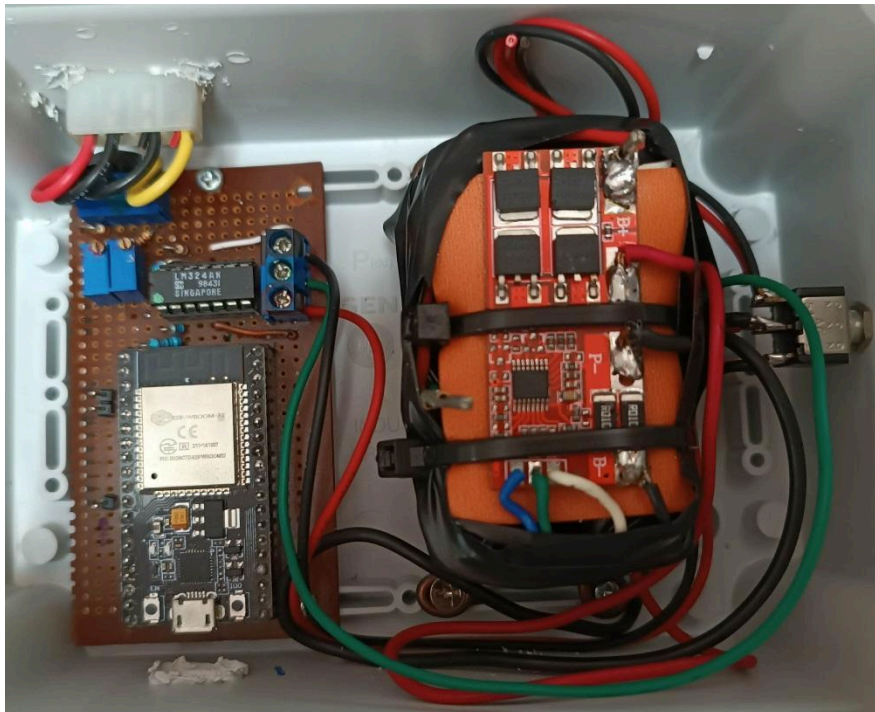


Figura 40 - Nuevo Módulo de adquisición y transmisión wifi para tensión y corriente.

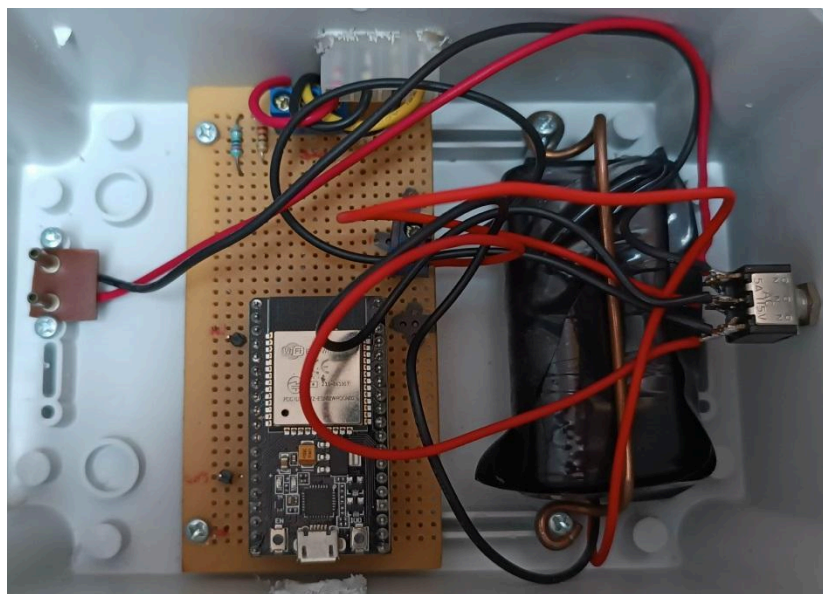


Figura 41 – Nuevo Módulo de adquisición y transmisión wifi para potenciómetro.

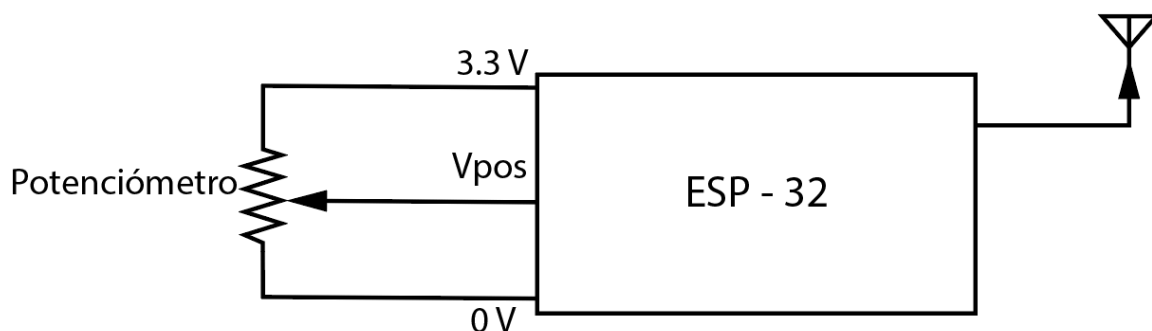


Figura 42 - Esquema del sistema de adaptación/acondicionamiento de señal, adquisición y transmisión de las mediciones de sensor de rotación.

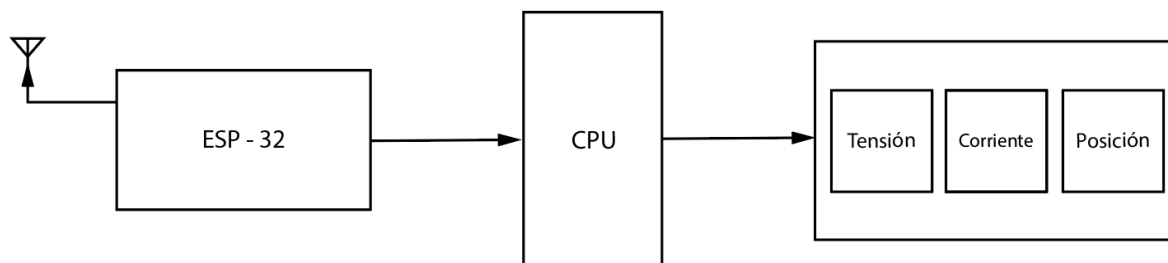


Figura 43 - Esquema de conexionado de la placa receptora ESP-32 y desde el potenciómetro a la PC de adquisición y monitoreo.



Figura 44 - Nueva Interfaz software LabView. Representación de Posición, Tensiones y Corrientes medias/eficaces en tiempo real.

En la **primera prueba** se corrió el software y se comprobó que se recibían valores de las tres variables con todo conectado, a diferencia de lo que ocurría en el primer ensayo. El potenciómetro ahora no generó interferencias debido al nuevo Módulo de adquisición y transmisión wifi, lográndose la obtención de datos de posición del electrodo, reflejados por el aumento de los grados de rotación manual de la manivela a medida que el electrodo se consumía (ver Figura 45). La Figura 46 muestra que el avance del electrodo durante la prueba fue de aproximadamente 80 mm.

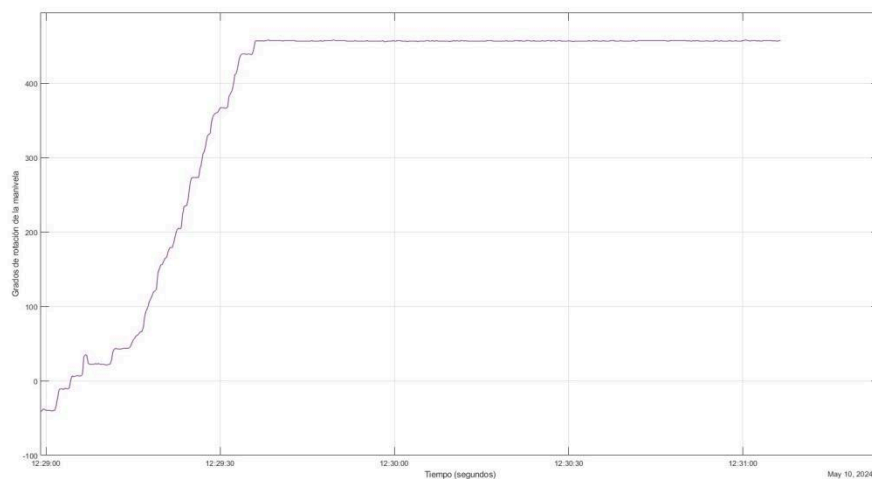


Figura 45 – Desarrollo de la posición (grados) del electrodo durante la primera prueba.

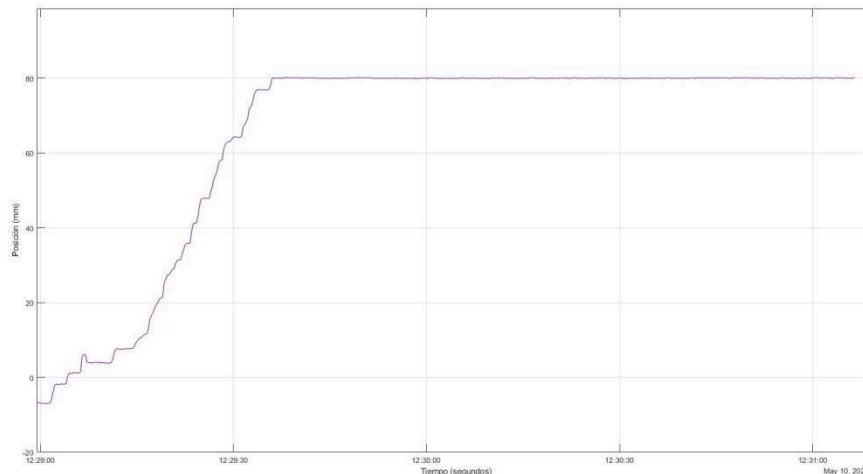


Figura 46 - Desarrollo de la posición (mm) del electrodo durante la primer prueba.

Además se observó que la tensión media variaba abruptamente entre 50 y 60 V en (ver Figura 47) y los valores de corriente media también lo hacían entre 700 y 1000 A (ver Figura 48) en intervalos de tiempo muy cortos. Eso ocurría porque no se podía establecer el arco eléctrico estable debido a un vacío no adecuado y/o distancia del electrodo incorrecta. Esos picos abruptos evidenciaban la interrupción de la fundición.

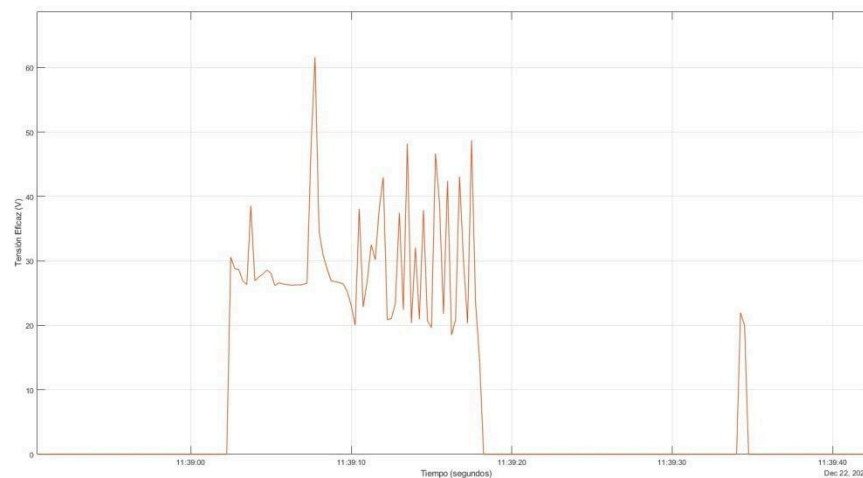


Figura 47 - Desarrollo de la tensión durante la primer prueba.

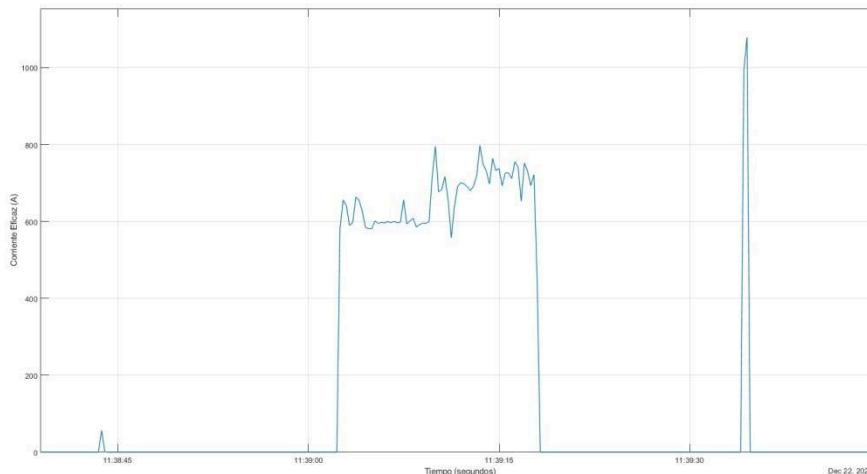


Figura 48 - Desarrollo de la corriente durante la primer prueba.

En la segunda prueba, se volvió a generar vacío y se cambió el electrodo. El arco ahora se mantuvo más estable por aproximadamente un minuto. Las figuras Figura 49 y Figura 50 muestran las mediciones de posición del potenciómetro y reflejan el avance de aproximadamente 81mm a medida que el electrodo se fundía. Si bien ahora también se observan picos en la tensión media (ver Figura 50), los valores de corriente media son algo más estables (ver Figura 51).

Los resultados de esta segunda prueba permitieron observar las tres variables (tensión, corriente y posición) sin interrupciones durante el ensayo. Con esta arquitectura de sistema de adquisición se espera poder seguir avanzando en ensayos que incrementen el conocimiento del proceso, que se serán necesarios para la automatización.

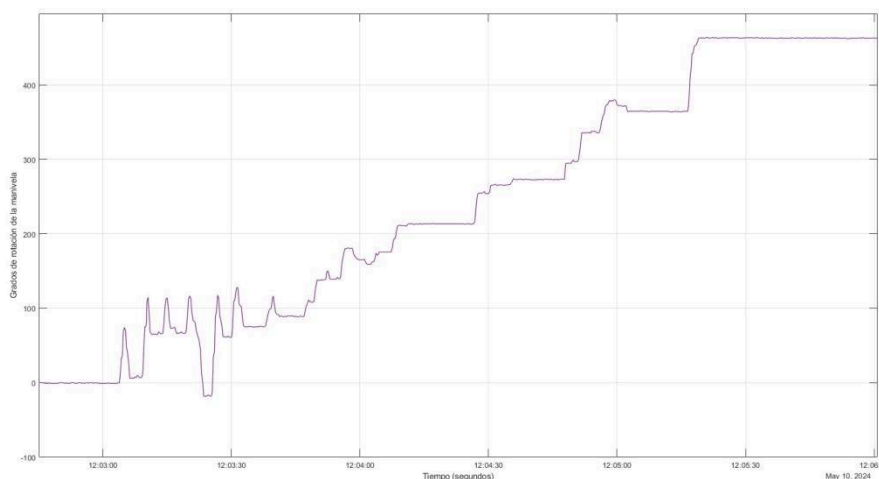


Figura 49 – Evolución de la posición (grados) del electrodo durante la segunda prueba.

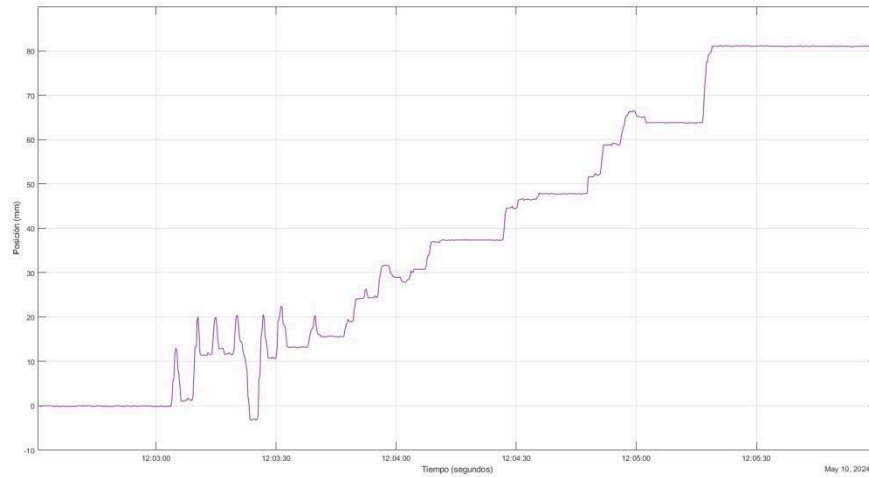


Figura 50 - Evolución de la posición (mm) del electrodo durante la segunda prueba.

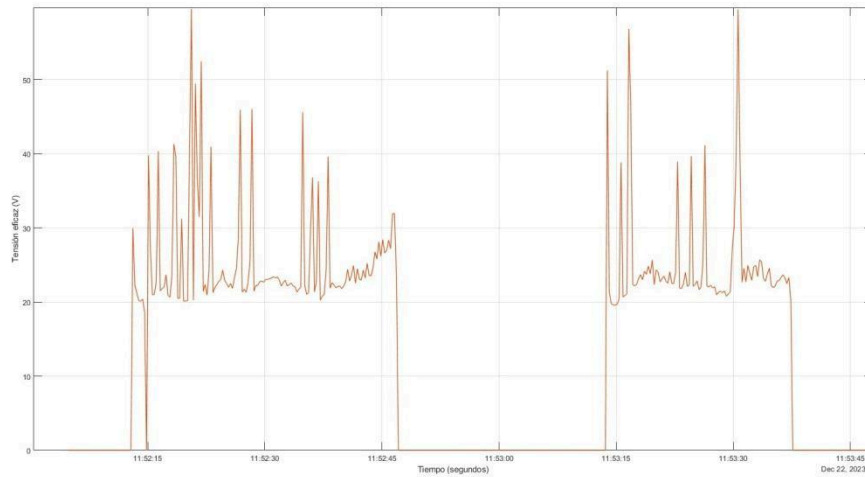


Figura 51 - Evolución de la tensión en la segunda prueba.

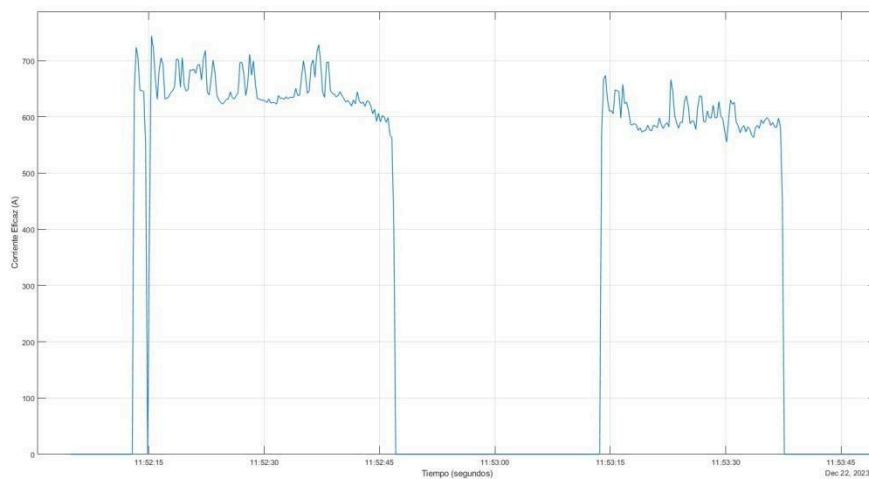


Figura 52 - Evolución de la corriente en la segunda prueba.

5 Capítulo 5. Conclusiones.

Se presentó la alternativa que tenía previsto implementar la Gerencia de Combustibles para el desarrollo de nuevas aleaciones para la industria nuclear: la fundición de la aleación en sucesivas etapas mediante un horno de arco eléctrico. El horno integra, entre otros componentes, una soldadora de alta corriente de diseño comercial marca Lincoln.

Se analizó en esa soldadora cómo están contruidos los bloques internos de potencia, para posteriormente modelarlos simplifcadamente. Con ese modelo se simuló su funcionamiento en un entorno típico de simulación dinámica como Simulink. Se verificó mediante contrastación que los resultados de la simulación eran acordes con lo medido en el equipo real.

Se mencionó que, dada la variabilidad prevista para los ensayos reales iniciales, se tenía escaso conocimiento de los mejores parámetros de configuración para el arco eléctrico. Esa suposición luego se comprobó prácticamente, haciendo indispensable registrar la mayor cantidad de datos posibles de los ensayos manuales para avanzar en el conocimiento del proceso.

Se eligieron inicialmente como parámetros a registrar la corriente del arco, la tensión entre el electrodo y el crisol y la distancia del arco (entre crisol y electrodo consumible). Entonces se obtienen por cada ensayo, dos parámetros de salida de la soldadora/fuente y un parámetro del electrodo consumible. La tensión y la corriente se midieron en forma directa sobre la fuente y la distancia entre el electrodo y el crisol se midió mediante un potenciómetro instalado sobre la manivela de avance manual. Luego se transfirieron esas mediciones de manera inalámbrica.

Se implementó un sistema para registro de esos experimentos que mediante sucesivas mejoras (ensayo 1 y ensayo 2) permitió registrar y mostrar los resultados de ensayos.

Con esos registros se espera poder continuar los ensayos, hasta obtener el conocimiento necesario para avanzar en la automatización mencionada en este informe, que permita motorizar y automatizar el movimiento del electrodo consumible.

6 Referencias Bibliográficas

- [1] Los procesos de fusión por arco de metales reactivos. A. Leyt.
- [2] Accurate quantitative EDS-TEM analysis of precipitates and matrix in equilibrium (apb) Zr1Nb alloys with Ta addition. P.A. Ferreiros, P.R. Alonso, D.P. Quiros, E. Zelaya, G.H. Rubiolo
- [3] Effects of thermo-mechanical process on phase transitions, hydrogen solubility and corrosion of Ta-modified Zr-1Nb alloys. P.A. Ferreirós, E.C. Savoy Polacka, L.A. Lanzani, P.R. Alonsoa, P.D. Quirós, J.I. Miezaa, G.H. Rubiolo.
- [4] Operator's Manual. IDEALARC DC-1000
- [5] Assembly and Installation. The Lincoln Electric Company
- [6] Mohan N., Robbins W. P., Undeland T. M., Nilssen R. y Mo O. "Simulation of Power Electronics and Motion Control Systems". Proc. IEEE, vol. 82, nº 8, pp. 1.287-1.302. (1994)
<https://la.mathworks.com/products/simscape-electrical.html>
<https://la.mathworks.com/help/simscape/ug/introducing-the-simscape-block-libraries.html>

7 Anexos

7.1 Anexo 1. Cálculo de ángulo alpha.

Cómo se calcula en el modelo el ángulo alpha para obtener un cierto valor de tensión media sobre la resistencia [6].

El inversor trifásico de onda completa controlado por ángulo tiene seis tiristores en una configuración tipo puente como se ve en la *Figura 14*.

La carga es un circuito con una resistencia R.

La corriente en la carga circula por uno de los tres tiristores del grupo superior (Q1, Q3 o Q5) y por otro de los que conforman el grupo inferior (Q2, Q4 o Q6).

El instante natural de conducción de los tiristores del grupo superior es $2\pi \cdot f \cdot t = \pi/6$, mientras que para los del grupo inferior es $2\pi \cdot f \cdot t = \pi/6 + \pi$. El ángulo de encendido (α) se mide a partir de estos instantes.

Cada tiristor conduce durante $\pi/3$ rads, por lo que la tensión media de salida (expresión válida para $0 < \alpha < \pi$) resulta:

$$V_d = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \cdot \cos \cos(\alpha)$$

A partir de esta expresión se puede calcular el ángulo de encendido α necesario para poder obtener una dada tensión de referencia. En primer lugar la señal V_d referencia se normaliza con respecto a la tensión máxima que puede entregar el puente, esto es para $\alpha = 0$. Luego usando la inversa de la función coseno se puede calcular el ángulo α de encendido [5] (ver *Figura 53*).

$$\cos \cos(\alpha) = \frac{V_d^*}{\frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_{RMS}}$$

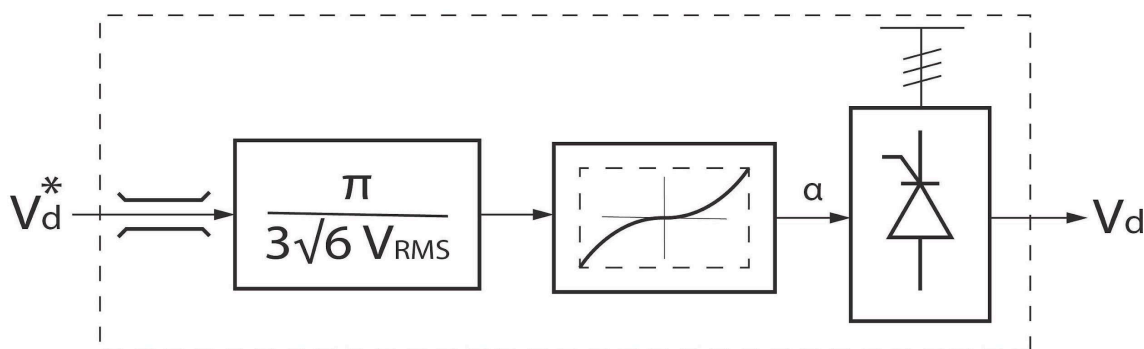


Figura 53 - Modelización del convertidor como bloque de ganancia unitaria.

7.2 Anexo 2. Código ARDUINO

7.2.1 Placa tensión y corriente

```
placa_tension_corriente Arduino 1.8.19
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
Subir Usando Programador

placa_tension_corriente

// Librerías necesarias
#include <Arduino.h>
#include <math.h>
#include <esp_now.h>
#include <WiFi.h>

const int ADC0_V = 36;
const int ADC3_I = 39;
const int ledPin = 2; // Pin para el LED interno
const unsigned long samplingTime = 250; // Tiempo de envío en milisegundos
double sumV = 0;
double sumI = 0;
double sumV2 = 0;
double sumI2 = 0;
unsigned long V = 0;
unsigned long I = 0;
unsigned long sampleCount = 0;
int indice=1;

unsigned long previousMillis = 0;
const long interval = 1;
long deltaT = 0;
bool ledState = LOW;

// MAC Address of responder - edit as required
//uint8_t broadcastAddress[] = {0x24, 0x6F, 0x28, 0x7A, 0xAE, 0x7C};
uint8_t broadcastAddress[] = {0x48, 0xe7, 0x29, 0x95, 0xad, 0x68}; //placa nuev

// Define a data structure
typedef struct struct_message {
    int a;
    int b;
    int c;
    int d;
    int e;
```

```
placa_tension_corriente Arduino 1.8.19
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

placa_tension_corriente

int c;
int d;
int e;
} struct_message;

// Create a structured object
struct_message myData;

// Peer info
esp_now_peer_info_t peerInfo;

// Callback function called when data is sent
void OnDataSent(const uint8_t *mac_addr, esp_now_send_status_t status) {
    Serial.print("\r\nLast Packet Send Status:\t");
    Serial.println(status == ESP_NOW_SEND_SUCCESS ? "Delivery Success" : "Delivery Fail");
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);

    // Set ESP32 as a Wi-Fi Station
    WiFi.mode(WIFI_STA);

    // Initilize ESP-NOW
    if (esp_now_init() != ESP_OK) {
        Serial.println("Error initializing ESP-NOW");
        return;
    }

    // Register the send callback
    esp_now_register_send_cb(OnDataSent);

    // Register peer
    memcpy(peerInfo.peer_addr, broadcastAddress, 6);
    peerInfo.channel = 0;
```

```
placa_tension_corriente Arduino 1.8.19
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
Subir
placa_tension_corriente
// Register peer
memcpy(peerInfo.peer_addr, broadcastAddress, 6);
peerInfo.channel = 0;
peerInfo.encrypt = false;

// Add peer
if (esp_now_add_peer(&peerInfo) != ESP_OK) {
    Serial.println("Failed to add peer");
    return;
}

pinMode(ledPin, OUTPUT);
pinMode(ADC0_V, INPUT);
pinMode(ADC3_I, INPUT);
// digitalWrite(ledPin, HIGH);
}

void loop() {

    unsigned long startTime = millis(); // Tiempo inicial de muestreo

    reiniciar();
    while (millis() - startTime < samplingTime) {
        // Código de muestreo y cálculos dentro del tiempo de envío
        V= analogRead(ADC0_V);
        I= analogRead(ADC3_I);
        sumV += V;
        //Serial.println(sumV);
        sumI += I;
        sumV2 += pow(V,2);
        //Serial.println(sumV2);
        sumI2 += pow(I,2);
        sampleCount++;
    }
    double mediaV = sumV/sampleCount;
    double mediaI = sumI/sampleCount;
```

```
placa_tension_corriente Arduino 1.8.19
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

placa_tension_corriente
    sumI2 += pow(1,2);
    sampleCount++;
}
double mediaV = sumV/sampleCount;
double mediaI = sumI/sampleCount;
double efV = sqrt(sumV2/sampleCount);
double efI = sqrt(sumI2/sampleCount);
Serial.print("mediaV ");
Serial.print(mediaV);
Serial.print(",mediaI ");
Serial.print(mediaI);
Serial.print(",efV ");
Serial.print(efV);
Serial.print(",efI ");
Serial.print(efI);
Serial.print(",samples ");
Serial.println(sampleCount);
ledState = !ledState;
digitalWrite(ledPin, ledState);

myData.a=(int) mediaV;
myData.b = (int) mediaI;
myData.c=(int) efV;
myData.d = (int) efI;
myData.e = indice;

indice++;
// Send message via ESP-NOW
esp_err_t result = esp_now_send(broadcastAddress, (uint8_t *) &myData, sizeof(myData));

if (result == ESP_OK) {
    Serial.println("Sending confirmed");
}
else {
    Serial.println("Sending error");
}
```

```
placa_tension_corriente Arduino 1.8.19
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

placa_tension_corriente
Serial.print(efV);
Serial.print(",efI ");
Serial.print(efI);
Serial.print(",samples ");
Serial.println(sampleCount);
ledState = !ledState;
digitalWrite(ledPin, ledState);

myData.a=(int) mediaV;
myData.b = (int) mediaI;
myData.c=(int) efV;
myData.d = (int) efI;
myData.e = indice;

indice++;
// Send message via ESP-NOW
esp_err_t result = esp_now_send(broadcastAddress, (uint8_t *) &myData, sizeof(myData));

if (result == ESP_OK) {
    Serial.println("Sending confirmed");
}
else {
    Serial.println("Sending error");
}

}

void reiniciar(){
    sumV = 0;
    sumI = 0;
    sumV2 = 0;
    sumI2 = 0;
    sampleCount = 0;

}
```


7.2.2 Placa potenciómetro



```
placa_potenciometro Arduino 1.8.19
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

placa_potenciometro

// Librerías necesarias
#include <Arduino.h>
#include <math.h>
#include <esp_now.h>
#include <WiFi.h>

const int ADC0_V = 36;
const int ADC3_I = 39;
const int ledPin = 2; // Pin para el LED interno
const unsigned long samplingTime = 250; // Tiempo de envío en milisegundos
double sumV = 0;
unsigned long V = 0;
unsigned long sampleCount = 0;
int indice=1;

unsigned long previousMillis = 0;
const long interval = 1;
long deltaT = 0;
bool ledState = LOW;

// MAC Address of responder - edit as required
//uint8_t broadcastAddress[] = {0x24, 0x6F, 0x28, 0x7A, 0xAE, 0x7C};
uint8_t broadcastAddress[] = {0x48, 0xe7, 0x29, 0x95, 0xad, 0x68}; //placa nueva

// Define a data structure
typedef struct struct_message {
    int a;
    int b;
} struct_message;

// Create a structured object
struct_message myData;
```

```

placa_potenciometro Arduino 1.8.19
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

placa_potenciometro

// Peer info
esp_now_peer_info_t peerInfo;

// Callback function called when data is sent
void OnDataSent(const uint8_t *mac_addr, esp_now_send_status_t status) {
    Serial.print("\r\nLast Packet Send Status:\t");
    Serial.println(status == ESP_NOW_SEND_SUCCESS ? "Delivery Success" : "Delivery Fail");
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);

    // Set ESP32 as a Wi-Fi Station
    WiFi.mode(WIFI_STA);

    // Initilize ESP-NOW
    if (esp_now_init() != ESP_OK) {
        Serial.println("Error initializing ESP-NOW");
        return;
    }

    // Register the send callback
    esp_now_register_send_cb(OnDataSent);

    // Register peer
    memcpy(peerInfo.peer_addr, broadcastAddress, 6);
    peerInfo.channel = 0;
    peerInfo.encrypt = false;

    // Add peer
    if (esp_now_add_peer(&peerInfo) != ESP_OK) {
        Serial.println("Failed to add peer");
        return;
    }
}

```

```
placa_potenciometro Arduino 1.8.19
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
Subir Usando Programador
placa_potenciometro

pinMode(ledPin, OUTPUT);
pinMode(ADC0_V, INPUT);
pinMode(ADC3_I, INPUT);
// digitalWrite(ledPin, HIGH);
}

void loop() {

    unsigned long startTime = millis(); // Tiempo inicial de muestreo

    reiniciar();
    while (millis() - startTime < samplingTime) {
        // Código de muestreo y cálculos dentro del tiempo de envío
        V= analogRead(ADC0_V);
        sumV += V;
        sampleCount ++;
    }
    double mediaV = sumV/sampleCount;
    Serial.print("mediaV ");
    Serial.print(mediaV);
    Serial.print(", samples ");
    Serial.println(sampleCount);
    ledState = !ledState;
    digitalWrite(ledPin, ledState);

    myData.a=(int) mediaV;
    myData.b = indice;

    indice++;
    // Send message via ESP-NOW
    esp_err_t result = esp_now_send(broadcastAddress, (uint8_t *) &myData, sizeof(myData));
}
```

```
placa_potenciometro Arduino 1.8.19
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

Subir

placa_potenciometro
reiniciar();
while (millis() - startTime < samplingTime) {
    // Código de muestreo y cálculos dentro del tiempo de envío
    V= analogRead(ADC0_V);
    sumV += V;
    sampleCount ++;
}
double mediaV = sumV/sampleCount;
Serial.print("mediaV ");
Serial.print(mediaV);
Serial.print(", samples ");
Serial.println(sampleCount);
ledState = !ledState;
digitalWrite(ledPin, ledState);

myData.a=(int) mediaV;
myData.b = indice;

indice++;
// Send message via ESP-NOW
esp_err_t result = esp_now_send(broadcastAddress, (uint8_t *) &myData, sizeof(myData));

if (result == ESP_OK) {
    Serial.println("Sending confirmed");
}
else {
    Serial.println("Sending error");
}

}

void reiniciar(){
    sumV = 0;
    sampleCount = 0;
}
```

7.2.3 Placa receptora

```
receptor Arduino 1.8.19
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

receptor
/*
  ESP-NOW Demo - Receive
  esp-now-demo-rcv.ino
  Reads data from Initiator

  DroneBot Workshop 2022
  https://dronebotworkshop.com
*/

// Include Libraries
#include <esp_now.h>
#include <WiFi.h>

// Define a data structure
typedef struct struct_message {
  int a;
  int b;
  int c;
  int d;
  int e;
} struct_message;

// Create a structured object
struct_message myData;

// Callback function executed when data is received
void OnDataRecv(const uint8_t * mac, const uint8_t *incomingData, int len) {
  char macStr[18];
  //Serial.print("Packet received from: ");
  //snprintf(macStr, sizeof(macStr), "%02x:%02x:%02x:%02x:%02x:%02x", mac[0], mac[1], mac[2], mac[3], mac[4], mac[5]);
  //Serial.println(macStr);
  memcpy(&myData, incomingData, sizeof(myData));
  //Serial.print("Data received: ");
  Serial.print(len);
  Serial.print(',');
  if (len>19){
    //Serial.print("Corriente: ");
    Serial.print(myData.a);
    Serial.print(',');
    //Serial.print("Tension: ");
    Serial.print(myData.b);
    Serial.print(',');
    //Serial.print("Muestra: ");
    Serial.print(myData.c);
    Serial.print(',');
    Serial.print(myData.d);
  }
}
```

receptor Arduino 1.8.19

Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

```

receptor
...
memcpy(&myData, incomingData, sizeof(myData));
//Serial.print("Data received: ");
Serial.print(len);
Serial.print(',');
if (len>19){
    //Serial.print("Corriente: ");
    Serial.print(myData.a);
    Serial.print(',');
    //Serial.print("Tension: ");
    Serial.print(myData.b);
    Serial.print(',');
    //Serial.print("Muestra: ");
    Serial.print(myData.c);
    Serial.print(',');
    Serial.print(myData.d);
    Serial.print(',');
    Serial.print(myData.e);
    Serial.println();
} else{
    Serial.print(myData.a);
    Serial.print(',');
    Serial.print(myData.b);
    //Serial.println();
    Serial.println();
}
}

void setup() {
    // Set up Serial Monitor
    Serial.begin(115200);

    // Set ESP32 as a Wi-Fi Station
    WiFi.mode(WIFI_STA);

    // Initilize ESP-NOW
    if (esp_now_init() != ESP_OK) {
        Serial.println("Error initializing ESP-NOW");
        return;
    }

    // Register callback function
    esp_now_register_recv_cb(OnDataRecv);
}

void loop() {
}

```