	GESTIÓN DE SERVICIOS ACADÉMICOS Y BIBLIOTECARIOS		CÓDIGO	FO-GS-15	
			VERSIÓN	02	
	ESQUEMA HOJA DE RESUMEN			FECHA	03/04/2017
				PÁGINA	1 de 1
ELABORÓ		REVISÓ	APROBÓ		
Jefe División de Biblioteca		Equipo Operativo de Calidad	Líder de Calidad		

### RESUMEN TRABAJO DE GRADO

AUTOR(ES):

NOMBRE(S): ANDERSON DAVID APELLIDOS: RODRÍGUEZ CASAS

NOMBRE(S): LIBARDO APELLIDOS: VEGA VILLAMIZAR

FACULTAD: INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA ELECTRÓNICA

DIRECTOR:

NOMBRE(S): ÁNGELO JOSEPH APELLIDOS: SOTO VERGEL

NOMBRE(S): HÉCTOR JAIME APELLIDOS: DULCE MORENO

TÍTULO DEL TRABAJO (TESIS): CONTROL INALÁMBRICO DE DESPLAZAMIENTO EN DÉCIMAS DE MILÍMETROS PARA UN MOTOR PASO A PASO BASADO EN SISTEMAS EMBEBIDOS

La seguridad es sumamente importante en el proceso de descarga en barrera dieléctrica, ya que en algunos casos los electrodos se ajustan manualmente, gracias al progreso de la tecnología con motores paso a paso se desarrolla un Sistema de control inalámbrico basado en la estructura para la elaboración de sistemas embebidos, teniendo un punto de partida claro desde los requerimientos establecidos hasta el cumplimiento de estos por medio de las pruebas de funcionamiento, obteniendo un producto de alta precisión y exactitud con un bajo coste energético y económico.

PALABRAS CLAVES: motor paso a paso, sistemas embebidos, precisión, requerimientos, barrera dieléctrica.

CARACTERÍSTICAS:

PÁGINAS: 78 PLANOS: 0 ILUSTRACIONES: 0 CD ROOM: 0

CONTROL INALÁMBRICO DE DESPLAZAMIENTO EN DÉCIMAS DE MILÍMETROS  
PARA UN MOTOR PASO A PASO BASADO EN SISTEMAS EMBEBIDOS

LIBARDO VEGA VILLAMIZAR

ANDERSON DAVID RODRÍGUEZ CASAS

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS INGENIERÍA ELECTRÓNICA

SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2021

CONTROL INALÁMBRICO DE DESPLAZAMIENTO EN DÉCIMAS DE MILÍMETROS  
PARA UN MOTOR PASO A PASO BASADO EN SISTEMAS EMBEBIDOS

LIBARDO VEGA VILLAMIZAR

ANDERSON DAVID RODRÍGUEZ CASAS

PROYECTO DE GRADO MODALIDAD TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA OPTAR  
POR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

DIRECTOR:

MSc. IE. ÁNGELO JOSEPH SOTO VERGEL

CODIRECTOR:

Ph.D. HÉCTOR JAIME DULCE MORENO

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS INGENIERÍA ELECTRÓNICA

SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2021

## ACTA DE SUSTENTACIÓN DE UN TRABAJO DE GRADO

Fecha: CÚCUTA, 19 DE MARZO DE 2021  
Hora: 17:00  
Lugar: MODALIDAD REMOTA SINCRÓNICO  
Plan de Estudios: INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
Título de la Tesis: "CONTROL INALÁMBRICO DE DESPLAZAMIENTO EN DÉCIMAS DE MILÍMETROS PARA UN MOTOR PASO A PASO BASADO EN SISTEMAS EMBEBIDOS."  
Jurados: IE, MSc INGRID CLARIETHE GUZMÁN ROMO  
IE, MSc MARCO AURELIO GARCÍA BERMÚDEZ  
Director: IE, MSc. ANGELO JOSEPH SOTO VERGEL  
Codirector: Lic, PhD. HECTOR JAIME DULCE MORENO

Nombre del Estudiante	Código	Calificación
LIBARDO VEGA VILLAMIZAR	1161220	CUATRO, SIETE (4,7)



INGRID CLARIETHE GUZMÁN ROMO

### MERITORIA



MARCO AURELIO GARCÍA BERMÚDEZ



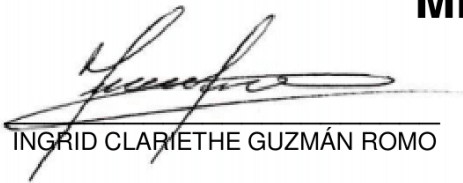
**DINAEL GUEVARA IBARRA**  
Coordinador Comité Curricular  
Ingeniería Electrónica

## ACTA DE SUSTENTACIÓN DE UN TRABAJO DE GRADO

Fecha: CÚCUTA, 19 DE MARZO DE 2021  
Hora: 17:00  
Lugar: MODALIDAD REMOTA SINCRÓNICO  
Plan de Estudios: INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
Título de la Tesis: "CONTROL INALÁMBRICO DE DESPLAZAMIENTO EN DÉCIMAS DE MILÍMETROS PARA UN MOTOR PASO A PASO BASADO EN SISTEMAS EMBEBIDOS."  
Jurados: IE, MSc INGRID CLARIETHE GUZMÁN ROMO  
IE, MSc MARCO AURELIO GARCÍA BERMÚDEZ  
Director: IE, MSc. ANGELO JOSEPH SOTO VERGEL  
Codirector: Lic, PhD. HECTOR JAIME DULCE MORENO

Nombre del Estudiante	Código	Calificación
ANDERSON DAVID RODRÍGUEZ CASAS	1161237	CUATRO, SIETE (4,7)

### MERITORIA

  
INGRID CLARIETHE GUZMÁN ROMO

  
MARCO AURELIO GARCÍA BERMÚDEZ

  
**DINAEL GUEVARA IBARRA**  
Coordinador Comité Curricular  
Ingeniería Electrónica



Vigilada Mineducación

GESTIÓN DE SERVICIOS ACADÉMICOS Y BIBLIOTECARIOS



**CARTA DE AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES PARA  
LA CONSULTA, LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y LA PUBLICACIÓN  
ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO**

Cúcuta,

Señores  
BIBLIOTECA EDUARDO COTE LAMUS  
Ciudad

Cordial saludo:

LIBARDO VEGA VILLAMIZAR, ANDERSON DAVID RODRÍGUEZ CASAS, identificados con la C.C. N° 1.090.464.157 y 1.090.503.706 , autores de la tesis y/o trabajo de grado titulado CONTROL INALÁMBRICO DE DESPLAZAMIENTO EN DÉCIMAS DE MILÍMETROS PARA UN MOTOR PASO A PASO BASADO EN SISTEMAS EMBEBIDOS presentado y aprobado en el año 2021 como requisito para optar al título de INGENIERO ELECTRÓNICO; autorizamos a la biblioteca de la Universidad Francisco de Paula Santander, Eduardo Cote Lamus, para que con fines académicos, muestre a la comunidad en general a la producción intelectual de esta institución educativa, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo de grado en la página web de la Biblioteca Eduardo Cote Lamus y en las redes de información del país y el exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad Francisco de Paula Santander.
- Permita la consulta, la reproducción, a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato CD-ROM o digital desde Internet, Intranet etc.; y en general para cualquier formato conocido o por conocer.

Lo anterior, de conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la ley 1982 y el artículo 11 de la decisión andina 351 de 1993, que establece que **“los derechos morales del trabajo son propiedad de los autores”**, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

FIRMA Y CEDULA  
1.090.464.157

FIRMA Y CEDULA  
1.090.503.706

## **Agradecimientos**

Dedicamos este trabajo a nuestras familias que han sido de gran apoyo en este recorrido, a nuestra Universidad Francisco De Paula Santander por el apoyo que nos dio para hacer posible la divulgación científica, nuestros profesores que con el amor a la educación nos transmitieron ese amor por la investigación especialmente al profesor Héctor Jaime Dulce y al ingeniero Angelo Soto, este logro es en parte de ustedes porque con su granito de arena nos dieron ese aliento que nos impulsó a culminar esta etapa de nuestras vidas. Al semillero de investigación SIUFIM, la fundación FORISTOM y la redCOLSI que por su apoyo incondicional en este proceso, y sus eventos nos ayudaron a encaminar lo que comenzó como un proyecto pequeño se convirtiera en una tesis de grado con mención meritoria.

## Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	16
1. Planteamiento del Problema	17
2. Justificación	18
2.1. Impacto Esperado	18
2.2. Beneficios Tecnológicos	19
2.3. Beneficios Económicos	19
2.4. Beneficios Sociales	19
2.5. Beneficios Institucionales	20
3. Alcances	21
3.1. Tipo de proyecto	21
3.2. Resultados Esperados	21
3.2.1. Resultados directos	21
3.2.2. Resultados Indirectos	22
4. Limitaciones y Delimitaciones	23
4.1. Limitaciones	23
4.2. Delimitaciones	23
5. Objetivos	25
5.1. Objetivo General	25
5.2. Objetivos Específicos	25
6. Marco Referencial	26
6.1. Antecedentes	26
6.2. Marco Teórico	29
6.2.1. Batería	29
6.2.2. Encoder	29
6.2.3. Microcontrolador ESP32	30



6.2.4.	Motor paso a paso con driver	30
6.2.5.	Descarga de barrera dieléctrica	30
6.2.6.	Sensores de final de carrera	31
6.2.7.	IDE Arduino	31
6.2.8.	Telecontrol	31
6.2.9.	Sistema Embebido	32
6.3.	Marco Legal	32
7.	Diseño metodológico	34
8.	Resultados	37
8.1.	Requerimientos funcionales y no funcionales	37
8.1.1.	Requerimientos funcionales	37
8.1.2.	Requerimientos no funcionales	38
8.2.	Diseño general	38
8.2.1.	Representación grafica	39
8.2.2.	Selección del hardware	41
8.2.3.	Representación electrónica	44
8.2.4.	Lógica de funcionamiento	46
8.3.	Control de lazo cerrado	50
8.3.1.	Comportamiento del motor	51
8.3.2.	Sistema de control	54
8.4.	Verificación de funcionamiento	55
8.4.1.	Pruebas de energía	56
8.4.2.	Pruebas de exactitud	58
8.4.3.	Pruebas de precisión	59
8.5.	Divulgación	59
	Conclusiones	61

Recomendaciones	63
Referencias Bibliográficas	64
Anexos	68

<b>Lista de figuras</b>	<b>Pág.</b>
<i>Figura 1.</i> Sistema Completo.	39
<i>Figura 2.</i> Módulo de control.	40
<i>Figura 3.</i> Módulo de desplazamiento.	40
<i>Figura 4.</i> Esquemático electrónico para el módulo de control elaborado en Eagle.	45
<i>Figura 5.</i> Esquemático electrónico para el módulo de desplazamiento elaborado en Eagle.	46
<i>Figura 6.</i> Seudocódigo realizado en draw.ino para el módulo de control.	49
<i>Figura 7.</i> Seudocódigo realizado en draw.ino para el módulo de desplazamiento.	50
<i>Figura 8.</i> Gráfico generado por curve fitting tool.	52
<i>Figura 9.</i> Análisis del gráfico generado por Matlab.	53
<i>Figura 10.</i> Esquema del control proporcional.	55
<i>Figura 11.</i> Comportamiento de los errores según la potencia proporcionada.	56
<i>Figura 12.</i> Gráficas generadas para la data de los errores obtenidos.	58
<i>Figura 13.</i> Certificado de participación ESI Internacional.	60

<b>Lista de Tabla</b>	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Tipos de sistemas de control inalámbrico.	18
Tabla 2. Requerimientos funcionales del sistema.	37
Tabla 3. Requerimientos no funcionales del sistema.	38
Tabla 4. Selección mediante matriz de pugh para el motor.	41
Tabla 5. Selección mediante matriz de pugh para el driver del motor.	42
Tabla 6. Selección mediante matriz de pugh para la pantalla.	42
Tabla 7. Selección mediante matriz de pugh para la tarjeta de desarrollo.	43
Tabla 8. Selección mediante matriz de pugh para el encoder.	51
Tabla 9. Criterios de evaluación para los indicadores de ajuste.	53
Tabla 10. Tipos de control para lazo cerrado.	54
Tabla 11. Consumo energético del módulo de control.	57
Tabla 12. Consumo energético del módulo de desplazamiento.	57
Tabla 13. Errores de desplazamiento.	59
Tabla 14. Intervalos de confianza.	59

## **Lista de Anexos**

**Pág.**

Anexo 1. Layout para el módulo de control.	68
Anexo 2. Layout para el módulo de desplazamiento.	68
Anexo 3. Código Modulo de control.	69
Anexo 4. Código módulo de desplazamiento.	73
Anexo 5. Módulo de desplazamiento.	76
Anexo 6. Módulo de control.	76
Anexo 7. Parte interna del módulo de control.	77

## **Resumen**

La seguridad es sumamente importante en el proceso de descarga en barrera dieléctrica, ya que en algunos casos los electrodos se ajustan manualmente, gracias al progreso de la tecnología con motores paso a paso se desarrolla un Sistema de control inalámbrico basado en la estructura para la elaboración de sistemas embebidos, teniendo un punto de partida claro desde los requerimientos establecidos hasta el cumplimiento de estos por medio de las pruebas de funcionamiento, obteniendo un producto de alta precisión y exactitud con un bajo coste energético y económico.

## **Abstract**

Security is the most important in the process of discharge dielectric barrier where the electrodes are adjusted manually in some cases, thanks to the progress of technology with stepping motors, its developed a wireless control system based on the elaboration of embedded systems, having a clear start point from the established requirements to the fulfillment of these by operation test, obtaining a product of high precision and accuracy with low-cost energy and economic.

## Introducción

La tecnología se ha convertido en un elemento indispensable y de gran utilidad al momento de emplear dispositivos que facilitan el desplazamiento o movilidad en lugares de alto riesgo, de alta precisión, controlados a distancia. Este tipo de dispositivos son muy costosos y en ocasiones no ofrecen la precisión requerida, no permiten prevenir daños en la piel o enfermedades, que son causadas por la manipulación de productos tóxicos o durante los trabajos realizados en las cercanías a fuentes de altas tensiones. Otras investigaciones han abordado la problemática del control de motores paso a paso (PAP), en las que algunos autores se han enfocado en el desarrollo de modelos matemáticos para aumentar la precisión [1], han implementado sistemas en aplicaciones como control de una fresadora mecánica con motores (PAP) [2]; usados en la creación de dispositivos para la medicina como un microscopio electroquímico de escaneo [3], también se han usado para enfocar rayos solares en celdas altamente eficientes que requieren implementar sistemas de seguimiento precisos [4] y diseñar sistemas de medición semiesféricas de alta precisión [5]; no obstante, ninguna de ellas se ocupa de aplicaciones de alto riesgo como la manipulación de electrodos de alto voltaje en donde la seguridad del operario debe ser prioritaria. De acuerdo con lo anterior, se propuso desarrollar un sistema inalámbrico que permitiera desplazar de forma milimétrica un electrodo para la descarga de barreras dieléctricas y que también pudiese ser implementado en cualquier tipo de aplicaciones, para lo cual se utilizó un hardware de control con comunicación bilateral semidúplex entre dos tarjetas de desarrollo. El dispositivo maestro envía órdenes de desplazamiento al dispositivo esclavo, mediante un sistema de radio frecuencia a 2.4GHz, que ordena al motor desplazar el electrodo y devolver la información del movimiento al dispositivo maestro, la cual es mostrada en una pantalla.



## 1. Planteamiento del Problema

La Universidad Francisco de Paula Santander en cumplimiento con las normas de seguridad y salud en el trabajo decretadas por el gobierno colombiano, en la resolución No. 1348 de 2009 establece que quienes desarrollen actividades relacionadas con la operación de energía eléctrica, deben proyectar y ejecutar las modificaciones en los procesos u operaciones, encerramiento o aislamiento de procesos, operaciones u otras medidas, con el objeto de controlar en la fuente de origen o en el medio, los agentes de riesgo a los que están expuestos los operarios [6].

En ese contexto el Grupo de Investigación en Instrumentación y Física de la Materia Condensada (GIFIMAC) ubicado en el primer piso de los laboratorios de física básica de la Universidad Francisco de Paula Santander, cuenta con un instrumento para medir el comportamiento de la descarga eléctrica entre dos electrodos en un ambiente controlado, se usa una cámara de vacío que permite alimentación de voltaje por un conector de dos vías. Anteriormente el operario tenía que abrir la cámara cada vez que quería cambiar la distancia de los electrodos y conectar o desconectar la alimentación de estos, procedimiento que vulneraba y ponía en riesgo de una descarga eléctrica, del orden de los 7kV, al operador encargado del proceso, situación que exigía extremo cuidado al momento de realizar cualquier manipulación.

Por lo tanto, se hizo necesario construir un dispositivo capaz de desplazar los electrodos de forma remota para que el operario no los manipule directamente y así mitigar el riesgo al cual estaba expuesto, por lo cual surgió la siguiente pregunta ¿Cómo implementar un dispositivo que permita controlar el movimiento del electrodo inalámbricamente utilizando sistemas embebidos?

## 2. Justificación

Un sistema de control inalámbrico se basa principalmente en usar comandos de operación y dispositivos conectados indirectamente para manipular un proceso de manera remota, lo cual permite desplazar un objeto sin intervención directa del usuario. Esta característica resultó esencial en la solución al problema planteado sobre seguridad en el uso de electrodos de alto voltaje, por esta razón fue necesario implementar este tipo de tecnologías con el uso de un dispositivo actuador que permitió realizar cambios en la escala milimétrica, logrando el control del proceso, visualizando en tiempo real el movimiento realizado.

Es importante mencionar las ventajas y desventajas que conlleva usar este tipo de sistemas dependiendo del grado de complejidad con el que se emplee; clasificados de la siguiente manera: clásico o simple, inteligente o intermedio, autónomo o avanzado. Teniendo en cuenta la tabla 1, según el tipo, se pueden abarcar una gran cantidad de problemáticas con respecto a las necesidades del investigador, este fue el encargado de decidir cuál modelo se ajusta mejor a su solución.

**Tabla 1.** Tipos de sistemas de control inalámbrico.

<b>Complejidad</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Clásico	Configuraciones simples y bajo costo.	Necesita operador y supervisión constante, difícil de utilizar.
Inteligente	Sistemas seguros: funciones de protección o Sistemas embebidos con microcontroladores y funciones automáticas.	Necesita operador y supervisión moderada.
Autónomo	No necesita operador, son sistemas seguros: funciones de protección o Sistemas embebidos con microcontroladores y funciones automáticas.	Sistemas muy complejos, necesita condiciones iniciales y computación robusta de alto costo.

**Fuente:** adaptada de [7].

### 2.1. Impacto Esperado

Con esta investigación se buscó mejorar las condiciones de seguridad en la manipulación del movimiento de electrodos en el grupo de investigación GIFIMAC, con respecto al método

utilizado para medir las descargas en barreras dieléctricas con el uso de electrodos, lo cual conlleva que los investigadores no estén expuestos a posibles complicaciones por mal uso del dispositivo al momento de hacer los cambios en las mediciones.

## **2.2. Beneficios Tecnológicos**

Con la automatización de este proceso se reduce el tiempo y el error en la toma de datos, esto ayuda a enfocarse en analizar los datos obtenidos para ser más productivos al momento de hacer investigación.

Resultó un sistema escalable, el cual se puede modificar para su uso en otras investigaciones donde se requiera mover objetos con alta fiabilidad.

## **2.3. Beneficios Económicos**

El sistema inalámbrico disminuye la constante manipulación humana de los electrodos, alargando su vida útil, por consiguiente se reducen los gastos de material en la investigación.

Se obtuvo un dispositivo con características competentes y fundamentalmente con un bajo consumo energético acompañado de precio moderado el cual permitió dar solución a los requerimientos del proyecto.

## **2.4. Beneficios Sociales**

Se mejoró la seguridad en los procesos de medición de descargas en barreras dieléctricas, al tener una menor exposición hacia los peligros que pueden ocurrir al realizar su indagación en el comportamiento del fenómeno, dando una idea positiva de todo el trabajo con los electrodos, generando más interés hacia este tipo de investigaciones.

Así mismo, se divulgó en eventos nacionales e internacionales donde se dieron a conocer los resultados a la comunidad científica, generando interés en los investigadores de producir proyectos que permitan el desarrollo de nuevas tecnologías.

## **2.5. Beneficios Institucionales**

El grupo de investigación es reconocido por la implementación de tecnologías de seguridad en el ámbito de la investigación, generando una imagen positiva del manejo de personal, elevando así también la imagen de la Universidad Francisco de Paula Santander.

El sistema de control inalámbrico fomenta la investigación de otras maneras de aumentar la seguridad en los ámbitos investigativos, dando espacio para el mejoramiento de la manera en que se trabajan estas mediciones.

### **3. Alcances**

El tipo de proyecto, así como el impacto esperado del mismo y los usuarios directos e indirectos serán descritos a continuación.

#### **3.1. Tipo de proyecto**

La implementación de un sistema de control inalámbrico en el proceso de uso de barreras dieléctricas para el estudio del comportamiento del arco eléctrico entre dos electrodos, con base a la aplicación de conocimientos y utilización del método científico fue una investigación descriptiva y experimental porque se buscó observar cómo se comporta el arco eléctrico con respecto a la distancia de los electrodos, y experimental porque un número de variables se mantuvieron constantes mientras las otras variaban, como la distancia de dos electrodos, la cual se manipuló mediante el control de un motor paso a paso con un pulso eléctrico enviado inalámbricamente.

#### **3.2. Resultados Esperados**

A continuación, se exponen los resultados directos e indirectos generados con cumplimiento de los objetivos del proyecto.

##### **3.2.1. Resultados directos**

Se obtuvo un sistema de control inalámbrico basado en sistemas embebidos para la manipulación de la distancia de un objeto en décimas de milímetros, el cual es escalable, modular y adaptable en la solución de otras problemáticas que requieran precisión, eficiencia energética y de bajo costo.

El grupo de investigación al contar con un sistema de control inalámbrico en el movimiento de los electrodos en su investigación con las descargas en barreras dieléctricas puede garantizar la seguridad óptima en el proceso de medición de los arcos formados por las

descargas de los electrodos, lo cual es de gran importancia para el desarrollo científico. Se reducen los errores ocasionados por mal ubicación de los electrodos de manera considerable, teniendo mediciones más precisas.

### **3.2.2. Resultados Indirectos**

Los investigadores conocieron los peligros a los que están expuestos sin el uso de la nueva tecnología, lo que hace que tengan un mayor cuidado al realizar mediciones en otras investigaciones con elementos similares a la aplicación del sistema.

Las personas involucradas en el desarrollo de esta idea tecnológica fueron beneficiados en las diferentes áreas de competencia necesarias para la compleción de este proyecto, obteniendo también conocimientos de áreas desconocidas como son las mediciones en experimentos de investigación en el área de física.

## **4. Limitaciones y Delimitaciones**

A continuación, se describen las limitaciones y delimitaciones presentadas de acuerdo con los factores involucrados en el proyecto.

### **4.1. Limitaciones**

Con respecto a la fabricación del sistema se contaron con los elementos puestos a disposición del semillero de investigación SIUFIM, siendo lo necesariamente básico para su implementación.

Teniendo presente la optimización de los recursos como base se descartaron las posibilidades de utilizar programas que necesiten compra alguna de licencia siendo la única opción emplear software con licencia libre.

Fue necesario alimentar el motor paso a paso con una batería ya que el sistema debía estar en un ambiente controlado que solo permitía alimentación para la bobina de alto voltaje.

En cuanto a la obtención de las medidas correspondientes a la precisión del motor, fue condicionado a la resolución del instrumento disponible en el grupo de investigación por ende la distancia recorrida por el motor debió ser lo suficiente para ser medida, los errores igualmente fueron asociados con este dispositivo de medición.

Para el aislamiento de los arcos eléctricos y la conservación de la integridad del sistema se utilizaron materiales dispuestos por el grupo de investigación GIFIMAC.

### **4.2. Delimitaciones**

La investigación y las pruebas necesarias de funcionamiento se realizaron en el laboratorio de física 203 que hace parte del semillero de investigación SIUFIM de la Universidad Francisco de Paula Santander, sede Cúcuta.

El sistema de control inalámbrico fue dividido en dos secciones el módulo emisor; él cual compuesto con pulsadores, pantalla de interfaz, dispositivo de comunicación y su respectivo microcontrolador y el módulo receptor de la misma manera tiene su dispositivo de comunicación, motor paso a paso, batería y su respectivo microcontrolador.

Mediante la variación de la separación entre los electrodos se logró controlar el arco eléctrico generado y la distancia recorrida por el motor; siendo la etapa final el lazo cerrado de control pertinente al movimiento del motor.



## 5. Objetivos

Para el desarrollo de este proyecto se plantearon los siguientes objetivos tomando en cuenta la duración de este.

### 5.1. Objetivo General

Desarrollar un Sistema de control inalámbrico en décimas de milímetros para un motor paso a paso utilizando sistemas embebidos.

### 5.2. Objetivos Específicos

- Realizar el análisis de requerimientos funcionales y no funcionales del sistema de control inalámbrico.
- Diseñar un control de lazo cerrado para el movimiento del motor paso a paso empleado para el proceso de descargas de barrera dieléctrica.
- Diseñar la arquitectura física y lógica del sistema de control inalámbrico.
- Verificar el funcionamiento del dispositivo en indicadores de eficiencia energética, costo y precisión.
- Divulgar los resultados obtenidos a lo largo de la investigación con la comunidad en general, promoviendo el uso de software libre para la solución de problemas con un grado de complejidad considerable.

## 6. Marco Referencial

Con base en la revisión realizada de las investigaciones desarrolladas sobre sistemas de control inalámbrico se presentan artículos y tesis que aportan información relevante para el desarrollo del proyecto.

### 6.1. Antecedentes

A continuación, se dan a conocer los trabajos previos en los cuales se soportó el proyecto.

**TITULO:** Sistema de control inalámbrico para la industria automotriz.

El sistema desarrollado propuso un diseño para controlar la velocidad y la dirección de un motor DC inalámbrica empleable a diferentes aplicaciones. Se empleó una tarjeta de desarrollo de bajo costo, la Freescale Freedom KL26Z siendo lo suficiente potente para ejecutar el controlador junto con un módulo WiFi ESP8266. Por medio del control PID se ajusta la velocidad tomando los valores de la velocidad establecidos y las lecturas proporcionadas por el encoder, este parámetro es ajustado variando el ciclo de trabajo de la señal pertinente al voltaje suministrado, método conocido como PWM [8].

**TITULO:** El diseño de un control de velocidad para un motor DC conectado a la red basado en WiFi.

Con el propósito de controlar la velocidad de un motor DC de manera remota utilizaron una placa ARM11, el driver para el motor L298N, encoder incremental y un tacómetro conectados a la placa por medio del protocolo RS485. Se utilizó PWM como método para variar la velocidad, muestran los algoritmos desarrollados, la manera empleada en la comunicación WiFi siendo el ARM11 el servidor y un computador el cliente, en este referente especifican la necesidad de configurar estos en el mismo segmento de la red [9].

**TITULO:** Control robusto de un motor AC mediante WNCS (Wireless Network Control System).

Se enfocaron en controlar la velocidad de un motor monofásico AC de 110 VAC inalámbricamente con su respectivo lazo cerrado. Para esta tesis utilizaron una Raspberry Pi donde se ejecutan el controlador FUZZY, LQG, el servidor y distribución de datos, en conjunto con un Arduino Mega incluyendo sus módulos WiFi, encoder y detector de cruce por cero ya que la velocidad del motor es controlada mediante un disparador recortando parte del ciclo perteneciente a la onda senoidal de voltaje en AC. La comunicación WiFi entre la Raspberry y el Arduino fue realizada a través de un router, además de esto se empleó una nube con su respectiva base de datos en la cual se puede manipular el motor [10].

**TITULO:** Control para un sistema solar de bombeo de agua usando el microcontrolador ESP32 de bajo costo.

La tarjeta ESP32 fue utilizada para controlar el motor de bombeo dependiendo de las condiciones del campo, obtenidas mediante el módulo HiGrow midiendo la temperatura, humedad del ambiente y del suelo, también se tienen los datos procedentes al nivel de agua del tanque, estos datos pueden ser cargados a una base de datos online o publicados empleando la placa como servidor. El sistema opera con base en los parámetros establecidos para activar el motor, adicionalmente, en la página web publicada por el servidor se puede manipular el estado del motor [11].

**TITULO:** Arquitectura multiagente distribuida para redes inalámbricas de control en tiempo real para múltiples plantas.

Se propuso una arquitectura de red en árbol con la cual se puedan controlar redes con baja latencia de sensores y actuadores inalámbricos (WSAN), emplearon el protocolo IEEE 802.15.4

tomando ventaja de su flexibilidad en las comunicaciones. El sistema está basado en MAS (Multi-agent Systems) lo que permite añadir nodos de sensores adicionales al programa o quitarlos, sin necesidad de reprogramar para incluirlos. Este proyecto permitió procesar los datos tomados de varios nodos de una planta con demasiadas variables y analizarlos en tiempo real lo que ayuda a evitar grandes gastos en sistemas de monitoreo convencionales [12].

**TITULO:** Diseño de una red de sensores inalámbricos para la monitorización de inundaciones repentinas en la ciudad de Barranquilla, Colombia.

Con el fin de mitigar daños por desbordamientos de un arroyo en barranquilla se desarrolló una alerta temprana basada en la arquitectura WSN (Wireless Sensor Network) encargada de la lectura de los factores meteorológicos por seis nodos de sensores XBee Pro ZB, el nodo seis es asignado como coordinador con la función de cargar los datos al servidor, el cual posteriormente almacena esta información en la base de datos de la plataforma Waspnote [13].

**TITULO:** Modelado e identificación de un sistema electromecánico y diseño del control PID para gobernar inalámbricamente el desplazamiento de un objeto móvil.

Se presenta la caracterización de un motor DC de imanes permanentes, modelándolo como un circuito con su respectiva resistencia e inductancia hallando su función de transferencia con la cual se conoce la relación entre el voltaje aplicado y la velocidad angular, estos parámetros se hallan haciendo las mediciones correspondientes para posteriormente ser reemplazados en la función y probar su validez gráficamente. Procediendo con la identificación del motor se empleó un Arduino Uno para las lecturas y la herramienta System identification de Matlab para generar la función acorde a los datos. Por otra parte, se controla el motor inalámbricamente utilizando la tecnología ZigBee que emplea el protocolo WPAN (Wireless

Personal Área Network) conforme con las necesidades de la propuesta ya que se transmiten pocos datos a corta distancia [14].

## **6.2. Marco Teórico**

A continuación, se encuentran definidos los conceptos más relevantes necesarios para la correcta comprensión del proyecto.

### **6.2.1. Batería**

La batería de LI-ION tiene una salida de voltaje de 3.7V, con unas dimensiones cifradas en su nombre 18650, los dos primeros números (18) indican su diámetro (18mm) mientras que los 3 últimos números (650) indican su longitud (65mm). Este tipo de pilas son ampliamente usadas en linternas LED, ordenadores portátiles, bicicletas y hasta autos eléctricos. La ventaja principal de usar estas pilas es su bajo nivel de auto descarga y ausencia de efecto memoria teniendo una vida útil entre 500 y 1000 ciclos [15].

### **6.2.2. Encoder**

Es un transductor empleado en diferentes tipos de motor que permite medir la velocidad, posición o dirección convirtiendo señales análogas a su correspondiente equivalente digital en forma de bits o pulsos. Los encoders se clasifican comúnmente en incrementales y absolutos; el incremental es simple, proporciona el desplazamiento relativo del eje dependiendo de la cantidad de pulsos enviados, sin embargo, son susceptibles al ruido y suelen presentar fallas críticas al perder su alimentación; por otra parte, el absoluto tiene lecturas en paralelo lo que le permite interpretar código gray usado para minimizar los errores por transición obteniendo de esta manera la posición actual del motor [16].

### **6.2.3. Microcontrolador ESP32**

El ESP32 es una unidad de control multipunto con tecnología WiFi, Bluetooth y Bluetooth LE, que está dirigido a una amplia variedad de aplicaciones, que van desde redes de sensores de baja potencia hasta proyectos más elaborados como codificadores de voz, transmisión de música, etc. Es un módulo diseñado para ser escalable y adaptable; integra dos núcleos que pueden ser controlados individualmente y su frecuencia de trabajo puede ser modificada de 80MHz hasta 240MHz. Este módulo puede usar gran variedad de periféricos como sensores capacitivos, resistivos y de efecto Hall con protocolos como Ethernet, I2C, UART, I2S y SPI [17].

### **6.2.4. Motor paso a paso con driver**

Los motores paso a paso están compuestos por un estator cuya función es generar un campo magnético estacionario proporcionado por múltiples devanados electromagnéticos al ser alimentados, y un rotor hecho por imanes permanentes o hierro suave dentados que produce otro campo magnético, lo que hace que los polos del rotor sean atraídos por los polos opuestos del estator provocando el giro. Los devanados del estator cambian su alimentación en forma subsecuente electrónicamente. Estos motores utilizan drivers como circuitos de control de variables generalmente utilizados como controladores de velocidad, precisión y torque según su modo de operación [18].

### **6.2.5. Descarga de barrera dieléctrica**

Son descargas no térmicas, es decir, las capas de dieléctricos se comportan como limitadores de corriente lo que evita la formación de arcos térmicos posibilitando crear plasma en espacio libre; estas descargas se dan entre dos electrodos metálicos separados una distancia determinada que cumple con un gap óptimo para disminuir el consumo de energía. La DBD, a

presión atmosférica, tiene numerosas aplicaciones en la industria y es objeto de investigación para desarrollar dispositivos capaces de modificar la superficie de un material, generar ozono, esterilización biológica, etc. Una modificación importante que se hace a la forma convencional de hacer DBD es rellenar todo el espacio entre los electrodos con material dieléctrico en forma esférica lo que se traduce en un menor consumo de energía para generar plasma [19].

#### **6.2.6. Sensores de final de carrera**

Los sensores de final de carrera son definidos como interruptores de límite que se emplean para medir la posición, generando una señal eléctrica al detectar el movimiento ya que accionan un par de contactos. Estas señales se emplean en los circuitos de control para activar los actuadores y no se usan para controlar motores directamente [20].

#### **6.2.7. IDE Arduino**

El entorno de desarrollo integrado (IDE) de Arduino contiene una interfaz capaz de ofrecer a los usuarios herramientas para escribir el código de programación usando sus propias funciones, variables y estructuras o empleando el lenguaje de programación C++, está compuesta de un editor de texto que permite escribir el código, visualizar mensajes de su comportamiento, botones con los cuales revisarlo y cargarlo a la memoria del Arduino o incluso a diferentes tarjetas de desarrollo como las fabricadas por espressif, los programas creados con este entorno son llamados Sketches (Bocetos) y se almacenan con una extensión “.ino” que puede ser leída desde cualquier editor de texto [21] .

#### **6.2.8. Telecontrol**

El telecontrol tiene propósitos de adquirir y enviar información inalámbricamente para ejecutar acciones con base en la data adquirida, usa comandos de transmisión que son los encargados de comunicar las tareas que se necesitan desde el centro de control con sus

terminales remotas. Además, algunos tipos de telecontrol cuentan con pruebas de conexión, comprobación de pérdida de datos, sincronización entre terminales e informe de eventos inesperados [22].

### **6.2.9. Sistema Embebido**

Un sistema embebido son aparatos electrónicos diseñados con el objetivo de cumplir una necesidad específica para los cuales se definen los requerimientos necesarios de forma entendible para los desarrolladores junto con los límites presentes, evitando ambigüedades. Algunos ejemplos en el campo industrial serian: sistemas de monitoreo de pacientes, seguimiento de radar, defensas balística y adquisición de data [23].

## **6.3. Marco Legal**

Según el anexo general del RETIE resolución 9-0708 de agosto 30 de 2013 con sus ajustes, los productos contemplados allí deben dar cumplimientos a los requisitos establecidos mediante certificación de conformidad de producto, con algunas excepciones como las de los equipos con señales y sistemas de control, instalaciones que usen menos de 24V, que quedan exentas de presentar este certificado [24].

El protocolo IEEE 802.11 usa ondas en el espectro radioeléctrico el cual es regulado por la ITU-R (international telecommunication union – radio) y se necesita una licencia para ocupar una franja del espectro, pero la banda ISM (industrial-Científica-Médica) no requiere licencia y está disponible en cualquier lugar del mundo usa bandas de operación de 2.4GHz y su potencia máxima debe ser inferior a 1W [25].

Los términos de uso de Arduino IDE no permiten la copia, duplicación ni distribución de ninguno de sus logos, al momento de descargar el software, Arduino dispone para los usuarios de



manera gratuita un editor, corrector y soporte sobre los Sketchs (bocetos) allí escritos que se rigen por las normas de GPL, LGPL, código abierto y licencias públicas [26].

## 7. Diseño metodológico

Con el propósito de cumplir los objetivos específicos planteados se exponen las actividades realizadas.

**Objetivo específico 1:** Realizar el análisis de requerimientos funcionales y no funcionales del sistema de control inalámbrico.

Se describieron todos los requerimientos que debe satisfacer el sistema para cumplir el objetivo general, mediante tablas en donde se encuentren las especificaciones funcionales y no funcionales basados en la autonomía de la batería, inicialización del algoritmo, comunicación inalámbrica, manipulación del electrodo, interacción del usuario con el sistema, sensibilidad del sensor, consumo del sistema, precisión, entre otros indicadores de interés.

En el desarrollo del sistema se presentó un cambio en el orden de los objetivos específicos ya que se debía realizar primero el diseño lógico y físico del sistema para posteriormente realizar el control de lazo cerrado.

**Objetivo específico 2:** Diseñar la arquitectura física y lógica del sistema de control inalámbrico.

Se realizaron los diagramas de bloques que representan el funcionamiento del sistema mediante el uso de un software libre, se compararon con matrices de pugh los dispositivos competentes para seleccionar el microcontrolador, el motor, el driver y la batería, posteriormente se empleó Eagle, en el cual se hicieron las conexiones eléctricas entre cada componente usado para las funciones de comunicación, control e interfaz del usuario, finalmente se explicó el procedimiento lógico mediante pseudocódigo donde se encuentra la descripción de los pasos efectuados para la conexión inalámbrica, toma de decisiones y corrección de errores.

**Objetivo específico 3:** Diseñar un control de lazo cerrado para el movimiento del motor paso a paso empleado para el proceso de descargas de barrera dieléctrica.

Igualmente se comparó con una matriz de pugh los diferentes tipos de encoder selectos donde los requerimientos funcionales como la sensibilidad, costo y complejidad de adquisición fueron los criterios de mayor importancia, se modeló y simuló en Matlab con la herramienta curve fitting el proceso pertinente al movimiento proporcionado por el motor usando los datos leídos por el encoder, finalmente con base en la información del modelo obtenido se analizaron los diferentes tipos de control de los cuales se escogió el control proporcional.

**Objetivo específico 4:** Verificar el funcionamiento del dispositivo en indicadores de eficiencia energética, costo y precisión.

Se codificaron los algoritmos de programación para dar funcionalidad al sistema usando el lenguaje de programación de Arduino IDE, empleando librerías que permitieron la ejecución de los módulos de conexión inalámbrica en donde se definieron los comandos de transmisión, comunicación I2C y funciones capaces de detectar flancos. Con los datos del control proporcional se desarrolló el código de control con el fin de corregir los errores de movimiento.

Se realizaron pruebas unitarias para las etapas del sistema que permitieron conocer los indicadores de eficiencia y precisión, mediante el uso de una fuente de voltaje regulada, la cual visualiza los valores de corriente y potencia consumida se tomaron los datos pertinentes a la energía necesaria para el óptimo desempeño del actuador y el microcontrolador teniendo en cuenta la precisión exigida.

Se efectuaron pruebas holísticas que permitieron conocer las funcionalidades y falencias del sistema en general, para esto se elaboraron las conexiones de cada etapa analizada evaluando su capacidad de cumplir con los requerimientos funcionales y no funcionales propuestos, así

como detectar algún tipo de fallo en la comunicación mediante un indicador visual o pérdida de pasos en el motor leídos por el encoder.

**Objetivo específico 5:** Divulgar los resultados obtenidos a lo largo de la investigación con la comunidad en general, promoviendo el uso de software libre para la solución de problemas.

Se participó en el encuentro de semilleros a nivel departamental, nacional e internacional donde se realizó la presentación de los resultados y se realizó un artículo de revista donde se explica de forma ordenada el trabajo desarrollado.

## 8. Resultados

### 8.1. Requerimientos funcionales y no funcionales

Esta etapa cumple un rol crucial para el desarrollo exitoso del proyecto, siendo el enfoque necesario para las etapas de diseño e implementación. El equipo de trabajo (diseñadores, programadores y directores) define los requerimientos específicos considerando la interpretación de cada integrante, teniendo como propósitos restringir los objetivos del sistema de una manera precisa, consistente, sin ambigüedades y usarlos como aprobación para el producto final evaluando lo antes propuesto [23].

#### 8.1.1. Requerimientos funcionales

Los requerimientos funcionales señalan la manera de cómo debe comportarse el sistema con respecto a su ambiente, las interacciones que debe realizar dependiendo de los datos o acciones que se introduzcan.

Teniendo en cuenta los aspectos anteriormente mencionados se seleccionaron los requerimientos funcionales dispuestos en la tabla 2.

**Tabla 2.** Requerimientos funcionales del sistema.

No.	Funcionales
1	Se debe definir el rango de operación de desplazamiento del electrodo como 2 cm puesto que más distancia requerirá voltajes superiores para la descarga dieléctrica.
2	En el arranque el sistema se debe llevar el electrodo movable a un punto de referencia cero para evitar que haya contacto directo con el electrodo fijo.
3	Al inicializar el módulo de control se debe desplegar el título del proyecto, proceder con el estado de conexión inalámbrica y posteriormente en la capa de funcionamiento se debe visualizar el gap (el cual será modificable), el estado de la batería, señal inalámbrica, estado del controlador.
4	Se requiere un estado de reset que permita retornar el electrodo al estado inicial con el objetivo de realizar pruebas subsecuentemente de una manera eficaz.
5	El sistema debe ser capaz de desplazarse verticalmente en decimas de milímetros.
6	El GAP deberá ser la posición a la cual se quiere llevar el electrodo, de esta manera se pretende evitar errores de manipulación.

### 8.1.2. Requerimientos no funcionales

Estos requerimientos son básicamente restricciones sobre las cuales se debe encaminar el proyecto, como por ejemplo, sistemas operativos, software de desarrollo, tipos de comunicación, pero también indicadores de calidad que serán las características o cualidades necesarias para satisfacer los exigencias pertinentes al proceso por realizar, tales como, exactitud, autonomía, usabilidad y desempeño [27].

Teniendo en cuenta los aspectos anteriormente mencionados se seleccionaron los requerimientos no funcionales dispuestos en la tabla 3.

**Tabla 3.** Requerimientos no funcionales del sistema.

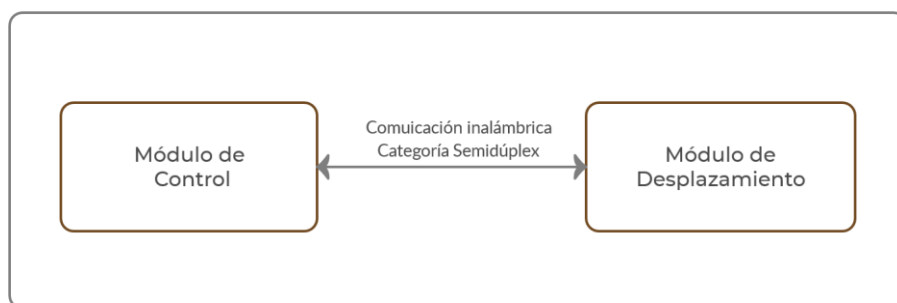
No.	No Funcionales
1	Emplear herramientas de programación de código abierto o libre ya que uno de los objetivos del semillero de investigación es motivar el uso de estos.
2	La inexactitud no debe superar el 3%.
3	La autonomía del sistema debe ser superior a 2 horas, para lo cual se requiere un consumo mínimo de energía en el motor garantizando la exactitud y precisión propuesta.
4	El sistema debe adquirir muestras bajo una latencia predeterminada mínima de 100ms.
5	Tamaño limitado a 13x13cm cuadrados de base y 25cm de altura debido a las dimensiones de la cámara de vacío disponible.
6	Debido a que se necesita implementar un control en lazo cerrado, se requiere un sensor de desplazamiento con una resolución mínima igual al número de pasos empleados por vuelta del motor.
7	Se requiere comunicación inalámbrica tipo semi dúplex.
8	El electrodo por condiciones de seguridad debe estar aislado del sistema embebido.

### 8.2. Diseño general

A continuación, se toman los requerimientos establecidos anteriormente con el propósito de: representar las ideas principales en diagramas de bloques formando así una vista generalizada, seleccionar los dispositivos electrónicos idóneos de acuerdo con los criterios planteados, empalmar el hardware realizando las conexiones correspondientes y plantear el funcionamiento del software mediante diagramas de flujo.

### 8.2.1. Representación grafica

El concepto general para el sistema se representa en la figura 1, donde se tienen los módulos que forman parte del sistema de control y el tipo de comunicación inalámbrica entre ellos, sabiendo que el producto final son dos aparatos electrónicos completamente funcionales. El módulo de control envía la distancia por recorrer al módulo de desplazamiento, posteriormente este retorna el nivel de su batería y estado actual de operación. Partiendo de la figura 1 se realizaron las dos figuras posteriores, las cuales son una vista específica para los módulos.



*Figura 1.* Sistema Completo.

Los componentes que forman el módulo de control se presentan en la figura 2, la pantalla es la encargada de mostrar la información del sistema, siendo más específico muestra los datos sobre el estado de las baterías y la posición del electrodo, se conectó mediante protocolo I2C, el medidor del estado de carga ofrece una lectura del estado de las baterías previniendo la descarga excesiva de esta y finalmente los botones conectados en topología Pull-Up virtual.

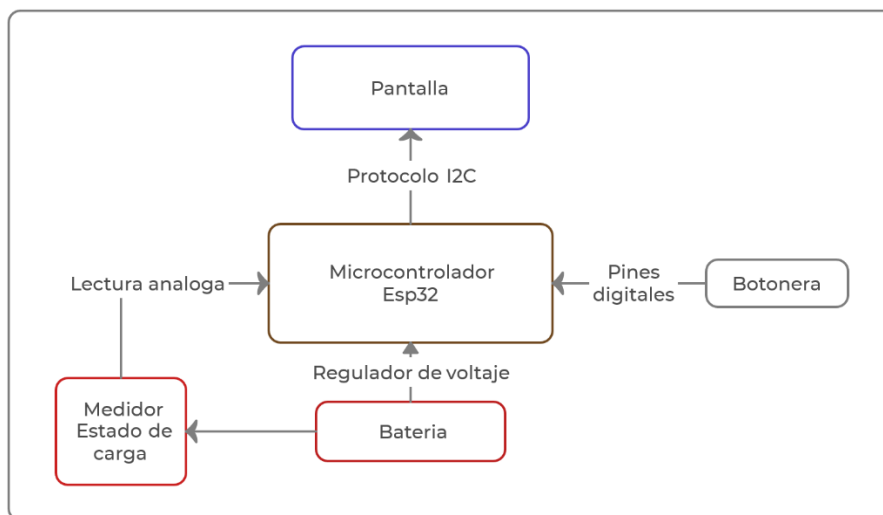


Figura 2. Módulo de control.

De igual manera en la figura 3 se tiene los componentes para el módulo de desplazamiento, ésta se configuró de modo que permite un sistema de lazo cerrado conformado por: el driver del motor, encargado de suministrar la potencia necesaria para producir su desplazamiento, el motor, como elemento actuador y el encoder, responsable de verificar la posición del electrodo es la deseada por el usuario.

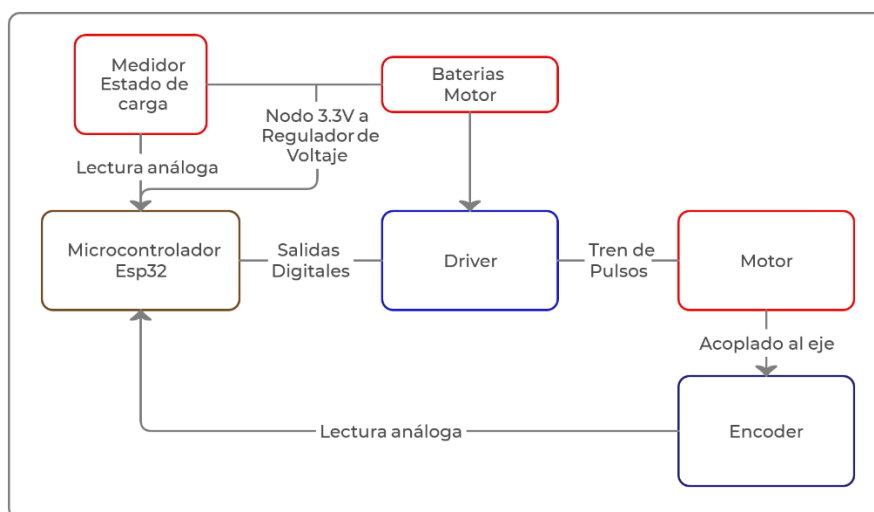


Figura 3. Módulo de desplazamiento.



Ambos dispositivos cuentan con el microcontrolador Esp32 como sistema de procesamientos, baterías con la capacidad necesaria para suplir la autonomía exigida y un medidor de estado de carga.

### 8.2.2. Selección del hardware

En la búsqueda de los componentes claves del sistema, se evaluaron con base en las características primordiales tomadas de los fundamentos del grupo de investigación, tales como el costo y el consumo, siendo los conceptos de evaluación general y para los específicos se tomaron las cualidades propias del objeto evaluado. Tomando el motor como ejemplo tendríamos el costo, el consumo (generales), torque, resolución e inexactitud (específicos).

Se utilizó la matriz de pugh siendo una opción coherente y pertinente para encasillar los conceptos comparados entre las diversas posibilidades que se encontraron, asimismo permitió adecuar los pesos para cada matriz teniendo en cuenta la relevancia para cada componente. El peso fue definido por un valor entre 1 y 4 basado en el cumplimiento de los requisitos:

- 1- Insuficiente.
- 2- Regular.
- 3- Sobresaliente.
- 4- Excelente.[28]

El motor se analizó en la tabla 4 donde el costo y consumo tienen mayor impacto debido a que hay una gran diferencia en la relación calidad precio entre las diferentes opciones, contrariamente el torque y la resolución son muy similares por lo cual su puntaje es menor.

**Tabla 4.** Selección mediante matriz de pugh para el motor.

Concepto de Evaluación	Puntaje por peso	Nema 17		Nema 23		Nema 14		Nema 17 con Encoder	
		P.	$\sum$ P.	P.	$\sum$ P.	P.	$\sum$ P.	P.	$\sum$ P.
Costo	35	4	140	2	70	3	105	1	35
Consumo	25	3	75	2	50	3	75	3	75
Torque	10	3	30	3	30	1	10	1	10

Resolución	20	3	60	3	60	3	60	3	60
Inexactitud	10	2	20	2	20	2	20	4	40
Total	---		325		230		270		220

El driver correspondiente para el manejo del motor se analizó en la tabla 5 donde se tiene el mismo caso que la tabla anterior para los conceptos de costo y consumo, dejando el puntaje restante para la resolución.

**Tabla 5.** Selección mediante matriz de pugh para el driver del motor.

Concepto de Evaluación	Puntaje por peso	DRV8825		DRV8880		A4988		TB67S279-F TG	
		P.	∑ P.	P.	∑ P.	P.	∑ P.	P.	∑ P.
Costo	40	2	80	3	120	4	105	2	35
Consumo permitido	35	2	70	3	50	3	75	2	75
Resolución	25	4	100	3	60	3	60	4	60
Total	---		250		230		270		220

La pantalla del módulo de control se analizó en la tabla 6 en este caso se contó con una limitación ligada a los caracteres que se deben presentar, tanto para la presentación del sistema como para la interfaz de trabajo, provocando que el tamaño sea el concepto más relevante.

**Tabla 6.** Selección mediante matriz de pugh para la pantalla.

Concepto de Evaluación	Puntaje por peso	Pantalla Lcd 16*2		Pantalla Lcd 20*4		Oled 128*32		Oled 128*64	
		P.	∑ P.	P.	∑ P.	P.	∑ P.	P.	∑ P.
Costo	20	3	60	2	40	4	80	3	60
Consumo	20	4	80	3	60	2	40	1	20
Resolución	25	2	50	2	50	2	50	3	75
Tamaño	35	2	70	4	140	1	35	1	35
Total	---		260		290		205		190

El microcontrolador necesario para los dos módulos se analizó en la tabla 7, en esta se tienen muchos conceptos debido a la complejidad del aparato, los más relevantes pensando en

los criterios definidos por los requerimientos específicos fueron: el coste, consumo, velocidad de procesamiento y protocolos compatibles.

**Tabla 7.** Selección mediante matriz de pugh para la tarjeta de desarrollo.

Concepto de Evaluación	Puntaje por peso	Lolin D32		Lolin D32 Pro		FireBeetle Esp32		Beetle Esp32	
		P.	$\Sigma$ P.	P.	$\Sigma$ P.	P.	$\Sigma$ P.	P.	$\Sigma$ P.
Costo	20	4	80	3	60	1	20	2	40
Consumo	15	4	60	4	60	4	60	4	60
Protocolos Compatibles	20	1	20	4	80	4	80	4	80
Pines I/O	10	4	40	4	40	2	20	1	10
Almacenamiento	10	1	10	3	30	3	30	3	30
Velocidad de procesamiento	20	4	80	4	80	4	80	4	80
Zócalo	5	2	10	4	20	3	15	1	5
Total	---		300		370		305		305

El peso asignado en el costo se incluyó el valor agregado por envío para los elementos importados. Se escogieron las opciones con los puntajes más altos al realizar la sumatoria de los criterios en cada tabla, los componentes empleados fueron:

- Motor: Nema 17.
- Driver: A4988.
- Pantalla: LCD 20\*4.
- Microcontrolador: Lolin D32 Pro.

Los componentes restantes necesarios para cada módulo se adquirieron en las electrónicas locales teniendo en cuenta los requerimientos específicos. Cabe resaltar que, para realizar el desplazamiento vertical, el motor se acopló a un tornillo de avance con 150mm de largo, 8mm de diámetro y 4mm por vuelta con su correspondiente chasis.

### 8.2.3. Representación electrónica

Para finalizar el diseño del hardware se realizaron las conexiones eléctricas empleando el software de diseño Eagle (freeware). Este cuenta con una gran cantidad de librerías permitiendo usar los componentes habituales (resistencias, conectores, botones, etc.), se crearon nuevas librerías con el fin de emplear los dispositivos seleccionados en las matrices de pugh (excepto la pantalla).

En la figura 4 se muestra el modelo esquemático para el módulo de control, en él se puede apreciar una versión similar a la pantalla con el protocolo de comunicación I2c realizando el empalme con el microcontrolador, se asignaron cuatro botones sin la necesidad de llevar una resistencia ya que estas son conectadas en pull-up virtual usando una herramienta de Arduino IDE permitiendo declarar un estado lógico positivo a los pines de entrada, se realizó un divisor de voltaje con el propósito de conocer el estado de la batería y a su vez proteger el pin análogo al cual está conectado ya que su voltaje máximo es de 3.3v.

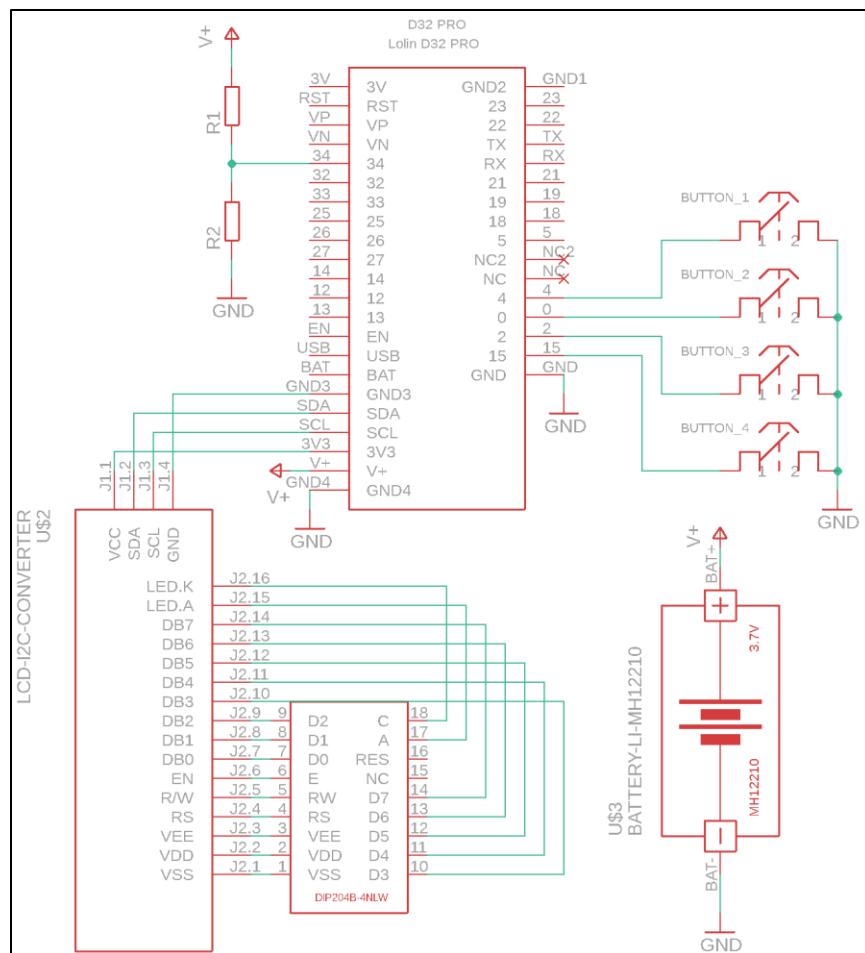


Figura 4. Esquemático electrónico para el módulo de control elaborado en Eagle.

En la figura 5 se observa el modelo esquemático del módulo de desplazamiento, para este se crearon todos los componentes excepto la batería, en la cual se modificaron las dimensiones en el layout para la pcb por una comercial. El motor seleccionado es bipolar por ende solo cuenta con cuatro pines conectados al driver y su vez este empalma con el microcontrolador; el encoder fue diseñado en base a un sensor genérico, el cual cuenta con: los pines de voltaje de alimentación, voltaje de salida y tierra, recordando uno de los requerimientos funcionales con el propósito de reiniciar y configurar la distancia de los electrodos se utilizó un sensor de fin de carrera conectado al pin 15; asimismo se tienen dos divisores de voltaje uno para el sensor y otro para las baterías con el mismo objetivo del módulo anterior.

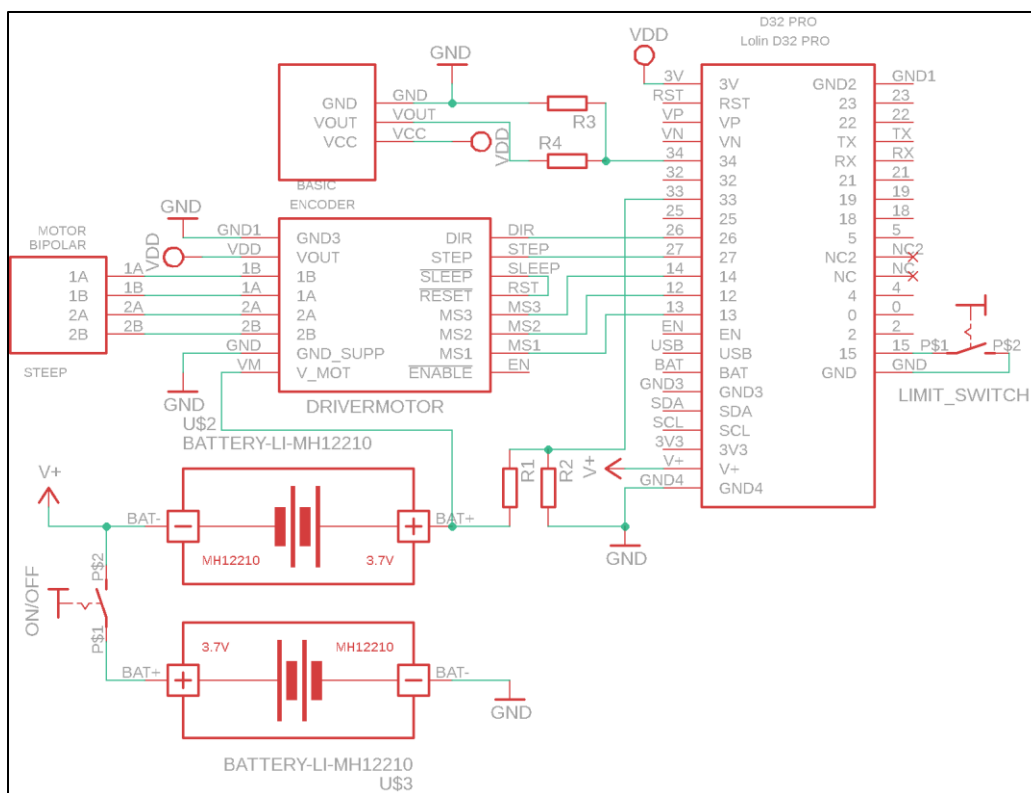


Figura 5. Esquemático electrónico para el módulo de desplazamiento elaborado en Eagle.

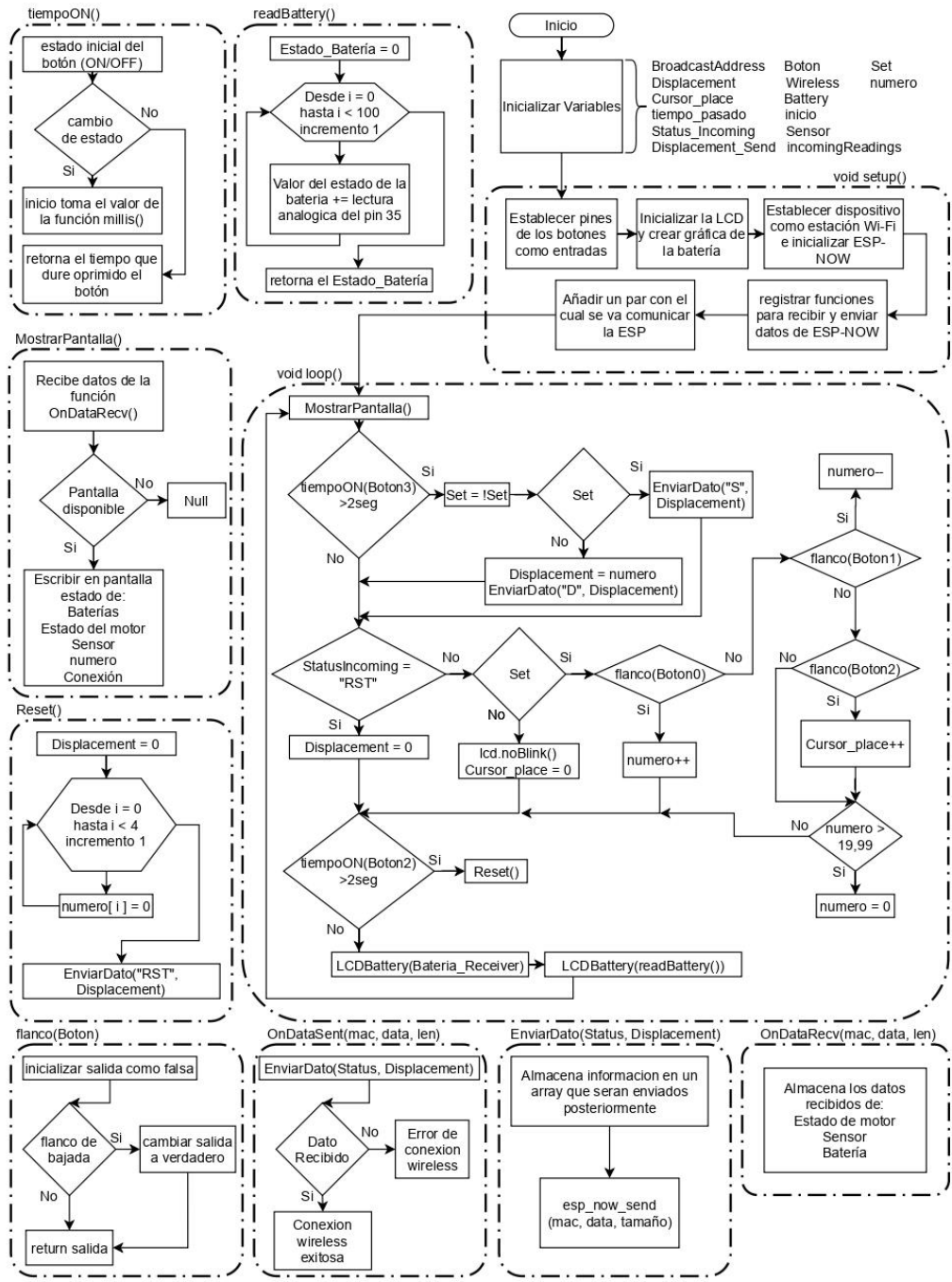
Cada módulo cuenta con su respectivo interruptor para el paso de la corriente evitando que las baterías se descarguen cuando no usen el sistema. En los anexos 1 y 2 se tienen los layouts generados para imprimir de los módulos; dentro de los cuales se ha optimizado el espacio con el fin de obtener placas con un tamaño compacto que cumplan con las dimensiones.

#### 8.2.4. Lógica de funcionamiento

Gran parte de los requerimientos se desarrollaron en esta área, los cuales fueron la guía en la realización de las funciones en el pseudocódigo. En la figura 6 se tiene el bosquejo del procedimiento lógico que ejecutó el mando de control; aquí se necesitan ocho funciones: `readBattery()`; toma el promedio de cien lecturas del estado de la batería y retorna el valor, `flanco(Botón)`; revisa un cambio de estado en el botón para evitar rebotes, `EnviarDato(Status,Displacement)`; toma los valores de estado y desplazamiento para enviarlos al

mando de desplazamiento, tiempoON(); cuenta la duración en milisegundo de un botón presionado y retorna este valor, OnDataRecv(mac, data, len); almacena los valores recibidos del otro mando, OnDataSent(mac, data, len); confirma la conexión inalámbrica entre los dispositivos, Reset(); establece el desplazamiento en el punto inicial posteriormente llena una matriz de cuatro elementos con ceros para finalmente enviar el estado de reinicio y el valor del desplazamiento por medio de la función enviar dato, MostrarPantalla(); toma los datos recibidos y los datos locales para mostrarlos en la pantalla.

Finalmente, para este módulo queda el programa principal, en el setup() se declaran todas las variables necesarias, ejecuta las librerías de la pantalla y el módulo de comunicación inalámbrica; en el loop() siendo un ciclo infinito del programa, comienza mostrando en pantalla las variables como batería, conexión, GAP, estado del motor, etc; seguidamente se hace una lectura del estado de todos los botones para tomar decisiones respecto a cada uno de ellos, si se oprime por más de dos segundos el botón 3 (verde) el dispositivo entra al modo de configuración donde se puede cambiar la distancia del electrodo con el botón 0 y botón 1 (azules), los cuales aumentan o disminuyen un dígito en la pantalla, para cambiar el dígito se debe oprimir el botón 2 con un tiempo menor a dos segundos, si el botón 2 es oprimido por más de dos segundos el dispositivo entra en modo reset, el cual establece todas las variables de desplazamiento con el valor de 0, para enviar el dato hacia el módulo de control se debe oprimir el botón 3 por más de dos segundos, todos los botones hacen uso de la función flanco(botón), pero solo los botones 2 y 3 hacen uso de la función tiempoON().





*Figura 6.* Seudocódigo realizado en draw.ino para el módulo de control.

En la figura 7 se bosqueja el funcionamiento del programa necesario para el módulo de desplazamiento, este comparte cuatro funciones con el anterior módulo: readBattery(), onDataRecv(mac, data, len), onDataSent(mac, data, len), EnviarDato(EstadoMotor, Sensor, bateria). En el setup() se declaran las variables pertinentes a las acciones de almacenamiento y control, seguidamente se inician los comandos de comunicación inalámbrica para establecer la conexión abriendo paso a la función loop(), donde inicialmente recibe el dato del estado de funcionamiento del motor, si este estado es “RST” el electrodo debe ir a la posición inicial 0, para el caso contrario, recibe el dato de desplazamiento para el electrodo, este dato se compara con el estado actual del electrodo y toma la decisión si el motor debe girar a la derecha o izquierda, pero antes de realizar el movimiento del motor, se envía el estado de trabajo(working) al módulo de control, el cual muestra en la interfaz gráfica el dato recibido, mientras esto ocurre el sensor toma los datos proporcionados por el giro del motor para ser comparados con el desplazamiento deseado, esta información es procesada para corregir errores si llegan a presentarse, cuando este proceso acaba se envía un dato al módulo de control “available” siendo mostrado por la interfaz al usuario indicando la disponibilidad para hacer cualquier cambio en el GAP del electrodo.

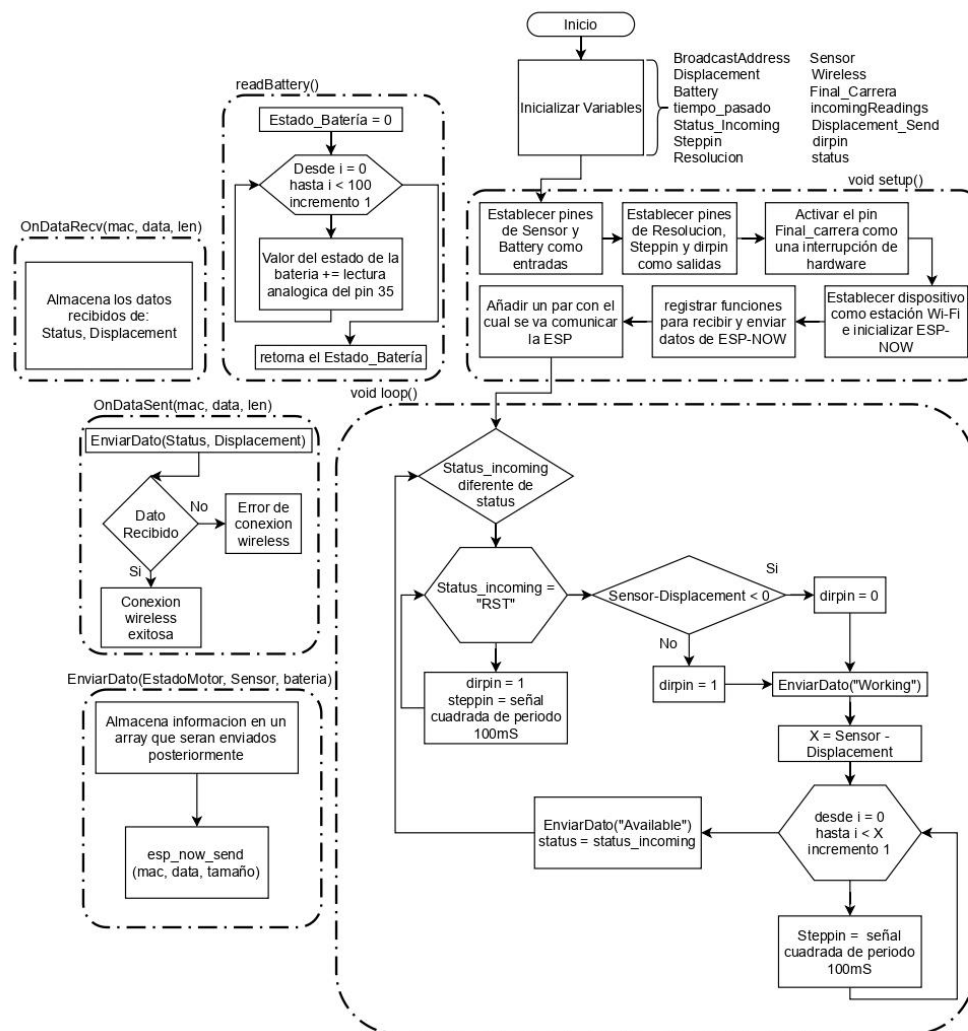


Figura 7. Seudocódigo realizado en draw.ino para el módulo de desplazamiento.

### 8.3. Control de lazo cerrado

En la búsqueda del encoder correspondiente para las lecturas del movimiento realizado por el motor, se seleccionó por lo menos uno de los diferentes modelos hallados, cada uno de estos tienen propósitos específicos, por lo tanto, según su precisión o escala de medida aumenta el costo y la complejidad de implementación. Estas opciones se compararon de la misma manera que los componentes anterior mediante la matriz de selección de pugh, teniendo el mismo criterio para los pesos pero con diferentes conceptos de evaluación, en la tabla 8 se encuentran

los cuatro modelos de encoder para este caso: rotativo óptico, lineal incremental, rotativo magnético y rotativo incremental respectivamente con el orden de la tabla, el concepto más relevante es la resolución puesto que debe ser por lo mínimo igual a los pasos del motor, condición establecida en los requerimientos no funcionales. Se obtuvo como opción viable en el encoder rotativo magnético P3015-V1-C360.

**Tabla 8.** Selección mediante matriz de pugh para el encoder.

Concepto de Evaluación	Puntaje por peso	Optical Rotatory Encoder P12		Encoder Lineal KA300		P3015-V1-C360		CAX60R 1312E10	
		P.	$\Sigma$ P.	P.	$\Sigma$ P.	P.	$\Sigma$ P.	P.	$\Sigma$ P.
Coste	20	3	60	2	40	4	80	1	20
Resolución	30	2	60	4	120	4	120	4	120
Disponibilidad	25	4	100	2	50	3	75	4	100
Dimensiones	15	4	60	3	45	4	60	3	45
Complejidad	10	2	20	2	20	3	30	2	20
Total	---		300		275		365		305

### 8.3.1. Comportamiento del motor

Se obtuvo el modelo matemático de manera experimental, inicialmente se tomó la data correspondiente al movimiento del motor respecto a la trama de distancia por recorrer, se desarrolló un programa en Arduino donde se estableció el recorrido y el intervalo de pasos a ejecutar con el retardo correspondiente para almacenar las lecturas del encoder; los valores generados por el sensor solo miden una vuelta por lo cual se tomó el valor inicial en el encoder como punto de referencia, siendo esta la condición para que el sumador actúe y de esta manera obtener una data incremental.

Posteriormente se organiza la data en Excel, ajustando la escala de medición y omitiendo los valores dados entre el cambio de los puntos máximos al mínimo del sensor, ya que es una alteración drástica con el propósito de mejor precisión al ser procesado. Esta información fue

importada a Matlab donde se ejecutó la herramienta curve fitting tool de la cual se tomaron las dos siguientes figuras. En la figura 8 se tiene la respuesta del motor al recorrer los dos centímetros junto con el modelo optimizado generado por esta herramienta, representados por los puntos negros y la línea azul respectivamente.

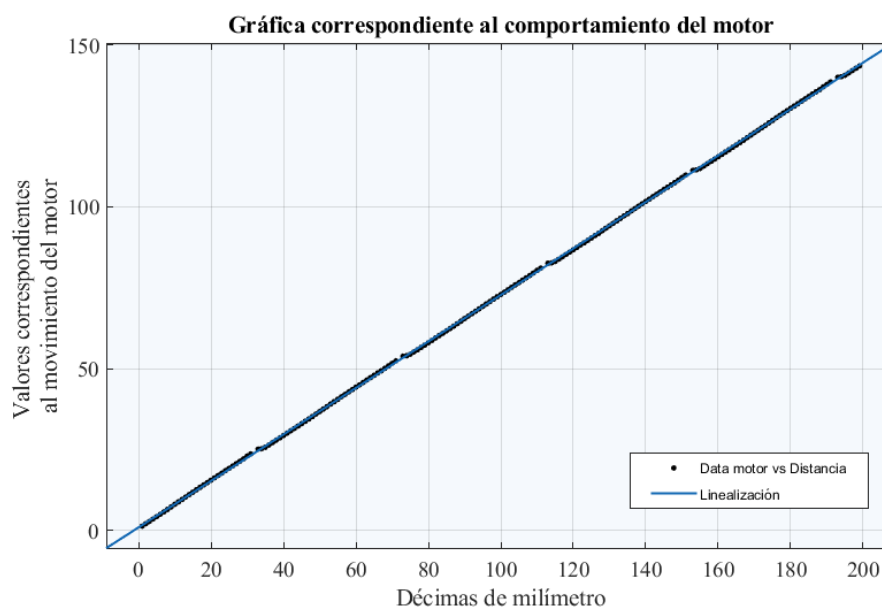


Figura 8. Gráfico generado por curve fitting tool.

El modelo optimizado obtenido se encuentra en la figura 9 adaptándose a la ecuación de una recta donde el coeficiente  $p1$  (0.7177) nos indica la variación entre el valor del sensor por paso realizado y el  $p2$  será el offset dado por la posición actual del sensor. De los indicadores de ajuste obtenidos en la misma figura se analizan dos: *R-square* y *RMSE*(*root mean square error*); el primero equivalente a 1, nos permite inferir que todos los valores de la data pueden ser interpretados por el modelo y para el segundo criterio se tomó una investigación como base para su análisis, de la cual se adaptó tabla 9.

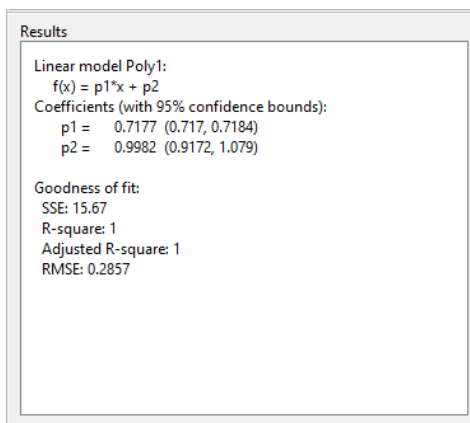


Figura 9. Análisis del gráfico generado por Matlab.

Esta tabla introduce dos variables por calcular SD (standard deviation), NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency coefficient). El SD se obtiene fácilmente en Matlab ejecutando el comando `std` para la data implementada, El NSE se calculó con base a la siguiente ecuación:

$$NSE = 1 - \left( \frac{RMSE}{SD} \right)^2$$

Este coeficiente representa el complemento de la relación entre la raíz del error cuadrático medio de las observaciones contra los valores predichos y la varianza. Toma valores entre  $-\infty \leq NSE \leq 1$  donde es ajuste perfecto sería un  $NSE = 1$  [29].

**Tabla 9.** Criterios de evaluación para los indicadores de ajuste.

Grado de adaptabilidad	Eficiencia de la interpretación del modelo	NSE
Muy bueno	$SD > 3.2 \text{ RMSE}$	$> 0.90$
Bueno	$SD = 2.2 \text{ RMSE} - 3.2 \text{ RMSE}$	0.80-0.90
Aceptable	$SD = 1.2 \text{ RMSE} - 2.2 \text{ RMSE}$	0.65-0.80
Insatisfactorio	$SD < 1.2 \text{ RMSE}$	$< 0.65$

Fuente: adaptada de [29].

Los valores para poder situar nuestro modelo en base a los errores obtenidos con los criterios de la tabla son:

$$\frac{SD}{RMSE} = 144, NSE = 0.9999, RMSE = 0.2857$$

Se tiene como resultado una relación SD/RMSE de 144 situándose en muy bueno donde solo se necesita ser mayor a 3.2 veces RMSE, para el coeficiente de eficiencia se obtiene el mismo resultado ya que solo requiere 0.9 y logró llegar a 0.9999 que es aproximadamente 1.

### 8.3.2. Sistema de control

El objetivo principal de este sistema es asegurar una posición con un error máximo establecido. La clase de motor implementado cuenta con gran precisión a lazo abierto, pero no se puede rectificar su posición al realizar el movimiento, por lo cual se requiere un sistema de control con un nivel de complejidad bajo que permita hacer cambios rápidamente.

**Tabla 10.** Tipos de control para lazo cerrado.

Tipo de Control	Características
Proporcional	-Respuesta más rápida del sistema -Aumenta la ganancia -Puede generar oscilaciones
Proporcional Derivativa	-Puede reducir las oscilaciones en estado transitorio -Reduce el tiempo de levantamiento -No aumenta el orden del sistema
Proporcional Integral	-Aumenta el coeficiente de amortiguamiento -Incrementa el tiempo de levantamiento -Mejora el error en estado estable
Proporcional Integral Derivativa	-Este tipo reúne las ventajas de los anteriores

**Fuente:** adaptada de [30].

En la tabla 10 tenemos los tipos de control, siendo todas opciones que se pueden implementar teniendo en cuenta que el primero será el de menor complejidad y el último el de mayor, las características del análisis proporcional son adecuadas para realizar la corrección de los errores en los puntos críticos del sistema sin llegar a complicar el grado del dispositivo.

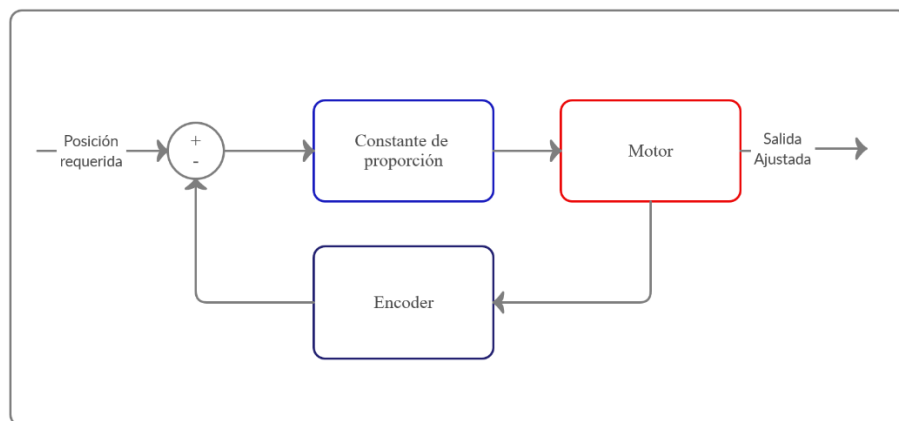


Figura 10. Esquema del control proporcional.

El funcionamiento para ajustar la salida es básico y se representa en la figura 10; explícitamente se toma la posición a la cual se deberá desplazar el motor y se ejecuta el desplazamiento con el tren de pulsos, luego el encoder traduce la posición actual del motor para ser comparada con la deseada, según el valor obtenido de esta comparación la constante actuará sobre el tren de pulsos para realizar los movimientos pertinentes en caso de un ajuste.

#### 8.4. Verificación de funcionamiento

En el entorno de pruebas se realizaron múltiples códigos que permitieron usar cada componente individualmente, en los anexos 3 y 4 se encuentran los códigos finales para cada módulo del sistema; principalmente se centró en las configuraciones permitidas por el driver A4988 para el motor, este motor cuenta con 200 pasos por vuelta en modo full step y se tienen disponibles arreglos de hasta un dieciseisavo de paso.

Para determinar la distancia recorrida en el tornillo de avance se utilizó un medidor de profundidad digital, el cual dispone de las siguientes especificaciones: resolución de 0.01mm, error absoluto de 0.02mm y rango de 25.4mm [31].

La data pertinente a la energía fue tomada de los valores proporcionados por la fuente regulada. Para medir la distancia se adaptó el profundímetro a la estructura vertical del tornillo

de avance, este cuenta con una barra delgada imantada que se desplaza a través del aparato, el cual cuantifica por medio del magnetismo el recorrido realizado.

#### 8.4.1. Pruebas de energía

En la configuración de paso completo utilizando el limitador de corriente propio del driver se realizaron mediciones para diferentes niveles de potencia, esto con el propósito de encontrar el punto de operación óptimo en la relación energía/error, con la información de la energía y los errores calculados se genera la figura 11.

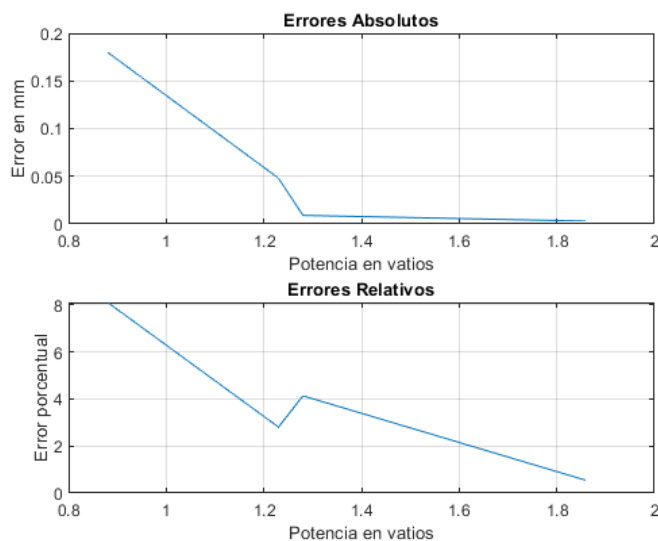


Figura 11. Comportamiento de los errores según la potencia proporcionada.

De los requerimientos se tiene un error relativo máximo del 3%, según la figura 11 los valores de potencia aproximadamente válidos para ese porcentaje del error están desde 1.5 vatios en adelante.

En las pruebas de consumo el voltaje mínimo para que el sistema no presente fallas fue 3.5V, por lo cual el intervalo para tomar las mediciones de energía está entre 3.6V y 4.2V con el fin de obtener los valores promedio con base en el ciclo útil de la batería.



La batería utilizada cuenta con 3,7V y 6000mA de los cuales se define una profundidad de descarga igual a el 50% por ende para los cálculos del tiempo pertinentes al ciclo útil se usaron 3000mA, además en la tabla 11 se tiene el consumo total de corriente para el módulo de control siendo 130mA, con esto se obtiene un tiempo estimado de operación equivalente a 21 horas y 30 min, se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{Tiempo de descarga} = \frac{\text{Corriente de la batería}}{\text{Corriente requerida por el sistema}}$$

**Tabla 11.** Consumo energético del módulo de control.

Componente	Voltaje(V)	Corriente(A)	Potencia(W)
Microcontrolador	3.8	0.019	0.072
Pantalla	3.8	0.120	0.457
Consumo total	3.8	0.139	0.529

En módulo de desplazamiento se usaron dos baterías conectadas en serie necesarias para suplir el voltaje de operación del motor, estas cuentan con las siguientes características: 3.7V y 3000mA; se define el mismo criterio para la profundidad de descarga, por consiguiente, se tomaron 1500mA para los cálculos. Se tienen dos estados: en reposo y en operación, para los cuales el consumo de corriente total es 225mA y 342mA respectivamente, información tomada de la tabla 12. Se obtuvo una estimación de 6 horas 40 min estando en reposo y 4 horas 25 min manteniendo el motor en uso, esto se calculó empleando la misma ecuación.

**Tabla 12.** Consumo energético del módulo de desplazamiento.

Componente	Voltaje(V)	Corriente(A)	Potencia(W)
Microcontrolador	3.8	0.132	0.502
Motor en reposo	7.6	0.093	0.702
Motor operando	7.6	0.210	1.59
Consumo total en reposo	5.353	0.225	1.204

Consumo total operando	6.117	0.342	2.092
------------------------	-------	-------	-------

### 8.4.2. Pruebas de exactitud

Se realizaron múltiples mediciones para todo el recorrido, siendo este de 20 milímetros con una diferencia de 0.1mm entre cada valor medido, iniciando asimismo desde 0.1mm, el módulo de desplazamiento para este punto ya está implementado, por lo cual el motor se manipuló con las baterías para la configuración de dieciseisavo de paso y con la potencia limitada a 1.6 vatios en promedio.

Posteriormente se fabricó la estructura para el encoder, el cual está empalmado con un acople de aluminio rígido de 8mm x 8mm en el final del tornillo transduciendo el giro realizado en distancia, este procesamiento de transducción se introdujo en el código empleando la ecuación generada por el curve fitting tool de Matlab; asimismo se realizaron las mediciones para todo el recorrido con las condiciones descritas en el párrafo anterior. Los valores de los recorridos realizados se promediaron y así se generó la figura 12.

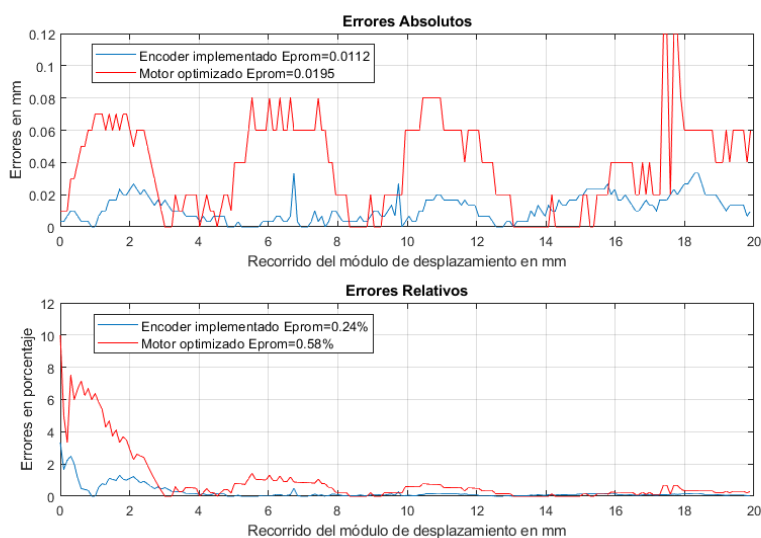


Figura 12. Gráficas generadas para la data de los errores obtenidos.

Debido a la gran cantidad de valores tomadas en la tabla 13 se tiene el promedio de los errores encontradas, esto con el propósito de una mejor interpretación.

**Tabla 13.** Errores de desplazamiento.

Tipo de data	Error promedio (mm)	Error sobre la medida	Error a fondo de escala	Desviación estándar
Motor optimizado	0.0198	0.47%	0.10%	0.0142
Encoder implementado	0.0114	0.24%	0.06%	0.0080

#### 8.4.3. Pruebas de precisión

Para cuantificar la precisión se realizaron las mediciones llevando el motor siempre a la misma posición repetidas veces con muestras de cincuenta datos aproximadamente, con esta información se calculó la desviación estándar para posteriormente encontrar los límites inferiores y superiores de los intervalos de confianza con un nivel de 99.9%. Este análisis se realizó para el motor en su configuración óptima y posteriormente con el encoder, la data resultante se dispone en la tabla 14. En los anexos 5, 6 y 7 se muestran los módulos del sistema terminados.

**Tabla 14.** Intervalos de confianza.

Tipo de data	Posición (mm)	Desviación estándar	Intervalo de confianza		Error relativo	
			Límite inferior (mm)	Límite superior (mm)	Lim. Inf	Lim. Sup
Motor optimizado	5	0.0094	4.99716687	5.00638869	0.0567%	0.0922%
	15	0.029	14.9395048	14.9664952	0.4033%	0.0903%
Encoder implementado	5	0.0084	4.98589105	4.99370895	0.2822%	0.0783%
	15	0.0145	14.9990524	15.0125476	0.0063%	0.0450%

#### 8.5. Divulgación

Como socialización de este proyecto se tienen las ponencias: departamental, nacional las que permitieron clasificar a la internacional realizada por el MILSET (International Movement

for Leisure Activities in Science and Technology) “expo-sciences Internacional” en Abu Dhabi del 22 al 28 de septiembre en 2019, en la figura 13 se tiene el certificado de participación.



*Figura 13.* Certificado de participación ESI Internacional.

Se envió el artículo realizado con el título “Wireless Control On Teths Of A Millimeter For A Motr Step By Step Based On Embedded Systems” para el ICECCE 2021 (International Conference on Electrical, Communication and Computer Engineering), este se encuentra en estado de aceptación.

## Conclusiones

Con las pruebas realizadas de forma experimental la energía consumida por el dispositivo es proporcional al torque necesario para mover el electrodo, con esto se obtuvo un consumo inferior a los dos vatios que permitió obtener errores inferiores al 1% dando a entender que el dispositivo es capaz de suplir varias necesidades dependiendo de las necesidades del usuario, para obtener más torque sin perder precisión es necesario aumentar la energía proporcionada al sistema, pero si no se requiere mucha exactitud, se puede bajar el consumo del dispositivo aún más.

Todos los algoritmos de programación se diseñaron de forma independiente lo que permitió modificar de una forma sencilla cada subrutina sin afectar el funcionamiento de los demás componentes que conforman el sistema.

En las configuraciones para el paso del motor se obtuvo una respuesta más rápida a medida que se utilizaban los modos de medio, cuarto, octavo y dieciseisavo de paso, pero para obtener este resultado se necesitó la frecuencia correcta entre cada paso; al obtener mayor rapidez se pierde torque.

En el intervalo de distancia entre los valores de 0.1 hasta 0.9 mm los errores sin el encoder no cumplía con el requisito planteado, por lo cual del encoder que se utilizó fue uno capaz de dar una sensibilidad de aproximadamente  $0,1^\circ$ , con esto se logró corregir cualquier posibilidad de error superior al 3% en el movimiento del electrodo, la señal del sensor era un diente de sierra y se linealizó para facilitar la medición del error; este también redujo la variación entre los errores encontrados a través del recorrido, lo que se traduce en una mejor estabilidad en el movimiento.

El uso de detector de flancos en programación ayuda a controlar y evitar errores en el uso de los botones, proporcionando un uso más robusto del módulo de control.

Las tarjetas de desarrollo con el chip ESP32 son de fácil adquisición, software gratuito para programarlas y además de esto tienen frecuencias de trabajo superiores a 80MHz, convertidor A/D de 10-bits con antena Wi-Fi, Bluetooth y muchas herramientas más, lo que la hace robusta y facilita la forma de crear dispositivos de comunicación inalámbrico haciendo uso de protocolos de comunicación ESP-NOW que en este caso ayudan a mejorar la seguridad en el trabajo de investigadores que se exponen a los riesgos eléctricos.

## Recomendaciones

Conocer a la perfección las funcionalidades de cada componente que se planean implementar garantizará un mejor diseño en cualquier proyecto, debido que al momento de adquirir los aparatos electrónicos se tienen en cuenta datos como voltajes de alimentación y voltajes proporcionados por tarjetas de desarrollo permitiendo compatibilidad entre estos. Las especificaciones como resolución y sensibilidad en el uso de sensores con microcontroladores permiten concordancia en la adquisición de datos.

Es importante verificar las dimensiones de los componentes disponibles en las librerías de Eagle, con el propósito de realizar un montaje sencillo del hardware con la PCB, ya que los pines se conectarán fácilmente sin la necesidad de hacer adaptaciones y además limpiar las pistas de la PCB después de haber soldado todas las piezas debido a que se pueden generar falsos contactos provocando errores de funcionamiento.

Para dispositivos que requieran constante manipulación es aconsejable usar cables de varios hilos, consideran que se tendrán frecuentes movimientos este tipo de conectores son menos propensos a rupturas, en este caso particularmente los botones y la pantalla LCD por diseño requerían estar a cierta distancia, por ende, no se pudo soldar directamente a la PCB.

### Referencias Bibliográficas

- [1] G. Mihalache, G. Livint, V. Horga, and A. Arcire, “A new mathematical model for the command sequence generator of a two-phase hybrid stepper motor,” in *Proceedings of the 2016 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering, EPE 2016*, 2016, no. Epe, pp. 640–643.
- [2] I. Cojuhari, I. Fiodorov, B. Izvoreanu, D. Moraru, and S. Botnaru, “Automatic temperature control in 3D printing of the polymer details,” *11th Int. Conf. Electromechanical Power Syst. SIELMEN*, vol. 2017-Janua, pp. 1–5, 2017.
- [3] A. Guver *et al.*, “A low-cost and high-precision scanning electrochemical microscope built with open source tools,” *HardwareX*, vol. 6, p. 17, 2019.
- [4] J. Pombas and J. Murta-Pina, “A low-cost sun tracking system based on image processing and a robot arm,” *Proc. - 2019 Int. Young Eng. Forum, YEF-ECE 2019*, vol. 1, no. 1, pp. 99–105, 2019.
- [5] J. G. Vera-Dimas *et al.*, “High-precision semi-spherical meter of two degrees of freedom,” in *Proc.SPIE*, 2012, vol. 8486.
- [6] Ministerio de la Protección Social, *Resolución 1348 de 2009*. 2009, p. 53.
- [7] J. A. Gázquez, N. N. Castellano, and F. Manzano-Agugliaro, “Intelligent low cost telecontrol system for agricultural vehicles in harmful environments,” *J. Clean. Prod.*, vol. 113, pp. 204–215, 2016.
- [8] D. Sarb and R. Bogdan, “Wireless motor control in automotive industry,” in *24th Telecommunications Forum, TELFOR 2016*, 2017, pp. 1–4.
- [9] K. Ren and J. Lin, “Control Platform Based on WiFi,” 2017.
- [10] S. L. Chuquín-Balseca and E. P. Pachacama-Durán, “Control Robusto de un Motor AC



- mediante WNCS (Wireless Network Control System),” UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, 2019.
- [11] S. Bipasha Biswas and M. Tariq Iqbal, “Solar Water Pumping System Control Using a Low Cost ESP32 Microcontroller,” *Can. Conf. Electr. Comput. Eng.*, vol. 2018-May, pp. 1–5, 2018.
- [12] A. González-Potes, W. A. Mata-López, V. Ibarra-Junquera, A. M. Ochoa-Brust, D. Martínez-Castro, and A. Crespo, “Distributed multi-agent architecture for real-time wireless control networks of multiple plants,” *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 56, pp. 142–156, 2016.
- [13] A. Cama-Pinto, G. Piñeres-Espitia, R. Zamora-Musa, M. Acosta-Coll, J. Caicedo-Ortiz, and J. Sepúlveda-Ojeda, “Diseño de una red de sensores inalámbricos para la monitorización de inundaciones repentinas en la ciudad de Barranquilla, Colombia,” *Ingeniare*, vol. 24, no. 4, pp. 581–599, 2016.
- [14] V. Srdanovic, O. I. B. Henao, and S. H. Ruiz-Obando, “Modelado e Identificación de un Sistema Electromecánico y Diseño del Control PID para Gobernar Inalámbricamente el Desplazamiento de un Objeto Móvil,” *CINTEX*, vol. 22, pp. 25–46, 2017.
- [15] EEMB, “Lithium-ion Battery DATA SHEET, Battery Model: LIR18650 2600mAh.” p. 10, 2010.
- [16] S. Wekhande and V. Agarwal, “High resolution absolute position Vernier shaft encoder suitable for high performance PMSM servo drives,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 55, no. 1, pp. 357–364, 2006.
- [17] Espressif Systems, “ESP32 - Technical Reference Manual.” p. 669, 2018.
- [18] R. T. I. Condit and D. D. of I. W-Jones, “Stepping Motors Fundamentals.” pp. 1–22, 2004.

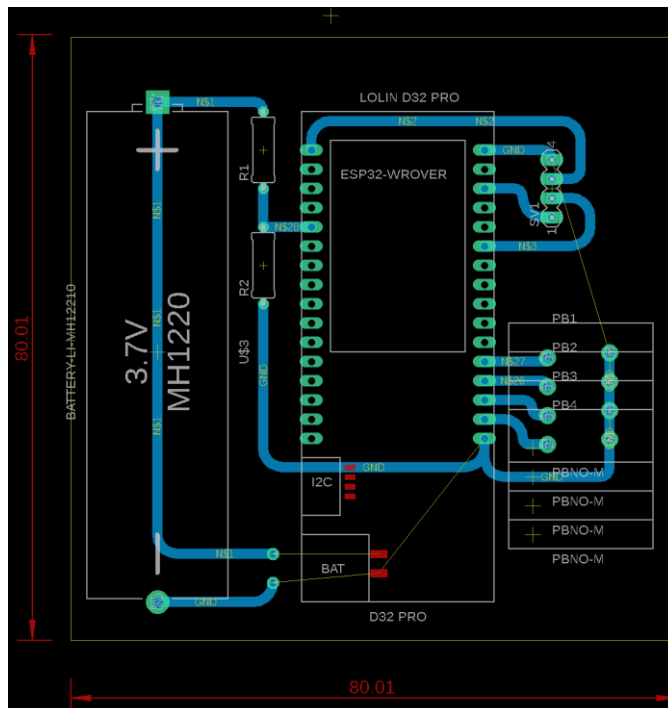
- [19] A. Méndez-Montoro de damas, “Plasmas de Descarga de Barrera Dieléctrica con Empaquetamiento Ferroeléctrico a Presión Atmosférica Aplicados a la Producción de Hidrógeno, Amoníaco y a la Descontaminación de Aire,” Universidad de Sevilla, 2017.
- [20] Allen-Bradley/Rockwell Automation, “Precision Limit Switch.” p. 2, 2001.
- [21] Arduino, “Arduino Software (IDE),” 2019. [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Environment>.
- [22] G. Sánchez, I. Gómez, J. Luque, J. Benjumea, and O. Rivera, “Using Internet protocols to implement IEC 60870-5 telecontrol functions,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 25, no. 1, pp. 407–416, 2010.
- [23] P. Zave, “An Operational Approach to Requirements Specification for Embedded Systems,” *IEEE Trans. Softw. Eng.*, vol. SE-8, no. 3, pp. 250–269, 1982.
- [24] Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIIE), *Anexo General Del Retie Resolución 9 0708*. 2013.
- [25] J. J. Anguís Horno, “Redes de área local inalámbricas: Diseño de la WLAN de Wheelers Lane Technology College/Capítulo 2,” Universidad de Sevilla, 2008.
- [26] Arduino, “Terms of Service,” 2019. [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Main/TermsOfService>.
- [27] J. C. Moreno and M. M. Marciszack, “La Usabilidad Desde La Perspectiva De La Validación de Requerimientos No Funcionales Para Aplicaciones Web,” 2013.
- [28] G. Lønmo, Linda;Muller, “Concept Selection - Applying Pugh Matrices in the Subsea Processing Domain,” pp. 583–598, 2014.
- [29] A. Ritter and R. Muñoz-Carpena, “Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments,” *J.*

*Hydrol.*, vol. 480, pp. 33–45, 2013.

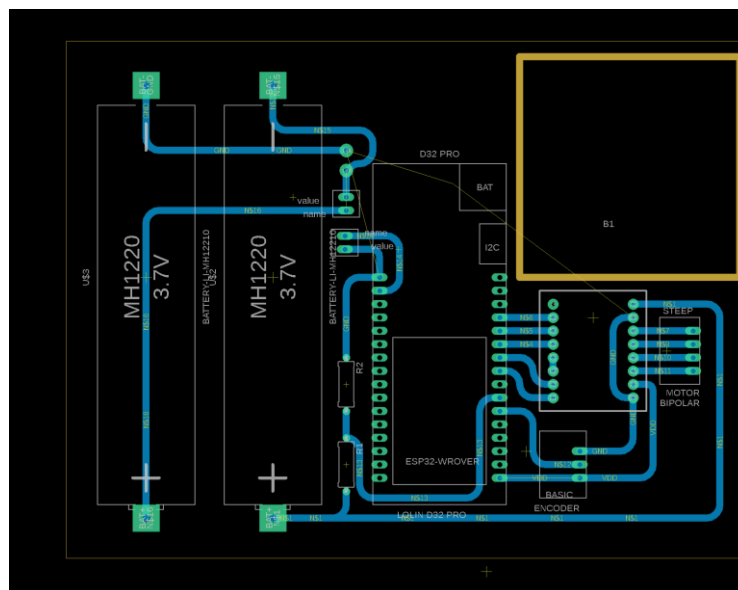
- [30] Héctor Vicente Martínez Martínez, “análisis, modelado y simulación en computadora del motor de corriente directa tipo serie.,” Universidad tecnológica de la mixteca, 2009.
- [31] S. Group, “Digital Tread Depth Gauge Model No: VS0560.” mackay, p. 1.

## Anexos

Anexo 1. Layout para el módulo de control.



Anexo 2. Layout para el módulo de desplazamiento.



## Anexo 3. Código Modulo de control.

```

#include <esp_now.h>
#include <WiFi.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Funciones.h>
Funciones funcion;
LiquidCrystal_I2C
lcd(0x3F,20,4); // set the LCD
address to 0x27 for a 16 chars
and 2 line display
// REPLACE WITH YOUR RECEIVER MAC
Address
uint8_t broadcastAddress[] =
{0xB4, 0xE6, 0x2D, 0xC3, 0xC9,
0x51};

bool estado_anterior[5], set =
false, parpadeo = false;
unsigned long tiempo_pasado[2],
inicio[2] = {millis(), millis()};
int Boton[4] = {15, 2, 0, 4},
n = 0,
numero[4] = {0,0,0,0},
Displacement = 0,
Wireless = 3,
Cursor_place[4] = {5,6,8,9},
LcdBattery[6] = {0, 1, 2, 5,
6, 7},
Bateria = 35,
aux = 0;

// Define variables to store
incoming readings
String Status_Incoming;
float Sensor,
Bateria_Receiver = 4;

// Variable to store if sending
data was successful
String success;

//Structure example to send data
//Must match the receiver
structure
typedef struct struct_message {
float Displacement_Send;
String Status;
String Mensaje;
float Battery;
float Sensor_Value;
} struct_message;

// Create a struct_message called
BME280Readings to hold sensor
readings
struct_message Pulsador;

// Create a struct_message to
hold incoming sensor readings
struct_message incomingReadings;

void setup() {
Inicializar();
delay(2000);
lcd.clear();

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

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

// Once ESPNow is successfully
Init, we will register for Send
CB to
// get the status of
Trasnmitted packet
esp_now_register_send_cb(OnData
Sent);

// Register peer
esp_now_peer_info_t peerInfo;
memcpy(peerInfo.peer_addr,
broadcastAddress, 6);
peerInfo.channel = 0;
peerInfo.encrypt = false; //sin
encriptado si no debe ser un
array de 16 bytes

// Add peer
if (esp_now_add_peer(&peerInfo)
!= ESP_OK){
Serial.println("Failed to add
peer");
return;
}
// Register for a callback
function that will be called when
data is received
esp_now_register_rcv_cb(OnData
Recv);

```

```

    EnviarDato("S", Displacement);
}

void loop(){
  MostrarPantalla(LcdBattery[3],L
cdBattery[4],LcdBattery[5],LcdBat
tery[0],LcdBattery[1],LcdBattery[
2], Status_Incoming, Sensor,
Wireless, set);

//  if(Tiempo_ON(&Boton[3],
&estado_anterior[3],
&inicio[0])>2000 &&
Tiempo_ON(&Boton[3],
&estado_anterior[3], &inicio[0])<
2100){
  if(funcion.getTime(&Boton[3],
2000, &inicio[0],
&estado_anterior[3])){
    set = !set;
    if(set){
      EnviarDato("S",
Displacement);
    }else{
      Displacement =
numero[0]*1000+numero[1]*100+nume
ro[2]*10+numero[3];
      EnviarDato("D",
Displacement);
    }
    delay(70);
  }
  if(Status_Incoming == "RST"){
    Displacement = 0;
  }
  if(funcion.setDelay(100,
&tiempo_pasado[0])){
    switch(set){
      case true:
        if(funcion.getFlanco(&B
oton[0], 0,
&estado_anterior[0])){
          numero[n]++;
        }
        else
          if(funcion.getFlanco(&Boton[1],
0, &estado_anterior[1])){
            numero[n]--;
          }
          else
            if(funcion.getFlanco(&Boton[2],
0, &estado_anterior[2])){
              //Serial.print("Boton
Rojo");
              n++;
              if(n>3) n = 0;
            }
            if(numero[0] > 1 ||
numero[0] < 0){
              numero[0] = 0;}
              for(int i = 1; i<4;
i++){
                if(numero[i] > 9 ||
numero[i]<0) numero[n] = 0;
              }
              break;
            case false:
              n = 0;
              break;
            default:
              break;
          }
        }
        if(funcion.getTime(&Boton[2],
2000, &inicio[1],
&estado_anterior[4])){
          Reset();
          delay(70);
        }
        LCDBattery(0,
Bateria_Receiver);
        LCDBattery(3, readBattery());
      }
}

```

- Definición de caracteres

```
byte FullB1[8] = {31, 16, 23,
23, 23, 23, 16, 31}; // Bateria
[1] lleno
byte FullB2[8] = {31, 0, 31, 31,
31, 31, 0, 31}; // Bateria [1]
lleno
byte FullB3[8] = {30, 2, 25, 29,
29, 25, 2, 30}; // Bateria [2]
lleno

byte LowB1[8] = {31, 16, 16, 16,
16, 16, 16, 31}; // Bateria [0]
Vacio
byte LowB2[8] =
{31, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
31}; // Bateria [1] Vacio
byte LowB3[8] =
{30, 2, 1, 1, 1, 1, 2,
30}; // Bateria [2] Vacio

byte Signal[8] =
{0, 0, 0, 31, 0, 14, 0, 4}
; // Señal [0] hay conexion
byte Offsig[8] = {20, 8, 20, 31
, 0, 14, 0, 4}; // Señal [1]
no hay conexion
```

- Funciones realizadas

```
float readBattery(){
    float Estado_Bateria = 0;
    for(int i = 0; i < 100; i++){
        Estado_Bateria =
Estado_Bateria +
analogRead(Bateria);
    }
    return Estado_Bateria =
((1.05672*2.00)*Estado_Bateria/10
0)*(3.30/4096);
}

// Callback 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");
    if (status == 0){
```

```
        success = "Delivery Success
:");
        Wireless = 3;
    }
    else{
        success = "Delivery Fail :(";
        Wireless = 4;
    }
}
```

```
// Callback when data is received
void OnDataRecv(const uint8_t *
mac, const uint8_t *incomingData,
int len) {
    memcpy(&incomingReadings,
incomingData,
sizeof(incomingReadings));
// Serial.print("Bytes received:
");
// Serial.println(len);
    Sensor =
incomingReadings.Sensor_Value;
    Status_Incoming =
incomingReadings.Status;
    Bateria_Receiver =
incomingReadings.Battery;
}
```

```
void EnviarDato(String Dato,
float Displacement1){
    Pulsador.Mensaje = Dato;
    Pulsador.Displacement_Send =
Displacement1/100;
    // Send message via ESP-NOW
    esp_err_t result =
esp_now_send(broadcastAddress,
(uint8_t *) &Pulsador,
sizeof(Pulsador));

// if (result == ESP_OK) {
//     Serial.println("Sent with
success");
// }
// else {
//     Serial.println("Error
sending the data");
// }
}
```

```
void MostrarPantalla(int
batteyC1,int batteyC2,int
batteyC3,int batteyD1,int
batteyD2,int batteyD3,String
Status1, float Sensor1,int
Conection, bool pantalla){
```

```

    lcd.setCursor(15,0);
    lcd.print("MC");
    lcd.write((byte)batteyC1);
    lcd.write((byte)batteyC2);
    lcd.write((byte)batteyC3);
    lcd.setCursor(15,1);
    lcd.print("MD");
    lcd.write((byte)batteyD1);
    lcd.write((byte)batteyD2);
    lcd.write((byte)batteyD3);
    lcd.setCursor(5,0);
    lcd.print("STATUS");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("MOD " + Status1);
    lcd.setCursor(0,2);
    lcd.print("GAP ");
    lcd.setCursor(11, 2);
    lcd.print("mm");
    lcd.setCursor(18,3);
    lcd.write((byte)Conection);
    if(pantalla){
        if(millis() -
tiempo_pasado[1] >= 250){
            tiempo_pasado[1] =
millis();
            parpadeo = !parpadeo;
        }
        if(aux != n) {
            parpadeo = true;
            lcd.setCursor(Cursor_place[
aux], 2);
            lcd.print(numero[aux]);
        }
        lcd.setCursor(Cursor_place[n]
, 2);
        if(parpadeo) lcd.print( numer
o[n]);
        else lcd.print("_");
    }else{
        lcd.setCursor(5, 2);
        if(Sensor1 < 10) {
            lcd.print("0");
            lcd.print(Sensor1);
        }
        else lcd.print(Sensor1);
        lcd.setCursor(14,2);
        lcd.print(" ");
    }
    aux = n;
}
void Inicializar(){
    lcd.init();
    // initialize the lcd
    lcd.init();
    // Print a message to the LCD.
    lcd.backlight();

    lcd.setCursor(2,0);
    lcd.print("Wireless Control");
    lcd.setCursor(3,1);
    lcd.print("Of Displacement");
    lcd.setCursor(7,2);
    lcd.print("SIUFIM");
    lcd.setCursor(8,3);
    lcd.print("UFPS");
    lcd.createChar(0, FullB1);
    lcd.createChar(1, FullB2);
    lcd.createChar(2, FullB3);

    lcd.createChar(3, Signal);
    lcd.createChar(4, Offsig);

    lcd.createChar(5, LowB1);
    lcd.createChar(6, LowB2);
    lcd.createChar(7, LowB3);
    funcion.setBotones(Boton,
sizeof(Boton)/sizeof(Boton[0]));
    Serial.begin(115200);
}

void Reset(){
    Displacement = 0;
    for(int i = 0; i < 4; i++){
        numero[i] = 0;
        lcd.setCursor(Cursor_place[i]
, 2);
        lcd.print(numero[i]);
    }
    n = 0;
    EnviarDato("R", Displacement);
}

void LCDBattery(int i, float
Bateria){
    if(Bateria < 3.54){
        LcdBattery[0 + i]= 5;
        LcdBattery[1 + i]= 6;
        LcdBattery[2 + i]= 7;
    }else if(Bateria >= 3.54 &&
Bateria< 3.74){
        LcdBattery[0 + i]= 0;
        LcdBattery[1 + i]= 6;
        LcdBattery[2 + i]= 7;
    }else if(Bateria >= 3.74 &&
Bateria < 3.94){
        LcdBattery[0 + i]= 0;
        LcdBattery[1 + i]= 1;
        LcdBattery[2 + i]= 7;
    }else{
        LcdBattery[0 + i]= 0;
        LcdBattery[1 + i]= 1;
        LcdBattery[2 + i]= 2;
    }
}

```



## Anexo 4. Código módulo de desplazamiento.

```

#include <esp_now.h>
#include <WiFi.h>
#include <Wire.h>
#include <Funciones.h>
Funciones funcion;
unsigned long tiempo_past[2];
bool Estado = false,
estado_anterior = false, giro =
false;
// REPLACE WITH YOUR RECEIVER MAC
Address

uint8_t broadcastAddress[] =
{0xB4, 0xE6, 0x2D, 0xC8, 0xEA,
0x71};
String funtion[3] = {"AVAILABLE",
"WORKING..", "RST"},
    Dato_Anterior = "Nada",
    Dato_Recibido, // Define
variables to store incoming
readings
    success; //
Variable to store if sending data
was successful

float Displacement_Incoming = 0,
    Sensor_12bits = 0,
    n = 0;
float Estado_Bateria = 0;
// Variables para Driver A4988
int steppin = 27, // declaramos
el pin 13 del arduino como step
dirpin = 26, // declaramos
el pin 12 del arduino con dir
Resolution[3] = {13, 12,
14},
    final_carrera = 15,
    Sensor_12 = 0,
    aux = 0,
    recta,
    Sensor = 34,
    Bateria = 35,
    Bateria2 = 25;
//Structure example to send data
//Must match the receiver
structure
typedef struct struct_message {
    float Displacement;
    String Status = "AVAILABLE";
    String Mensaje;
    float Battery;
    float Sensor_Value;
} struct_message;

// Create a struct_message called
BME280Readings to hold sensor
readings
struct_message
Informacion_Saliente;

// Create a struct_message to
hold incoming sensor readings
struct_message
Informacion_Entrante;

struct Button {
    const uint8_t PIN;
    bool pressed;
};
Button button1 = {final_carrera,
false};

void IRAM_ATTR isr() {
    if(funcion.setDelay(100,
&tiempo_past[0])){
        digitalWrite(dirpin, LOW);
        for(int i = 0; i < 1600; i++){
            digitalWrite(steppin,HIGH);
// las intrucciones que se
encuentran dentro del lazo
            delayMicroseconds(50);
// son las que aran que
nuestro motor se mueva ,es la
parte donde van los pulsos
            digitalWrite(steppin,LOW);
// necesarios para que el motor
se mueva
            delayMicroseconds(50);
        }
        aux = 0;
        recta = 0;
        Dato_Recibido = "Nada";
        Displacement_Incoming = 0;
        Sensor_12bits = 0;
        EnviarDato(funtion[2]);
        button1.pressed = true;
    }
}

void setup(){
    Inicializar();

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

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

```

```

    return;
}

// Once ESPNow is successfully
Init, we will register for Send
CB to
// get the status of
Trasmitted packet
esp_now_register_send_cb(OnData
Sent);

// Register peer
esp_now_peer_info_t peerInfo;
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;
}
// Register for a callback
function that will be called when
data is received
esp_now_register_recv_cb(OnData
Recv);
}

void loop() {

    if(funcion.setDelay(100,
&tiempo_past[1])){

        if(Dato_Anterior !=
Dato_Recibido){
//         if(Dato_Recibido == "S"){
//             Informacion_Saliente.St
atus = funcion[0];
//         }
//         if(Dato_Recibido == "D"){
//             Informacion_Saliente.St
atus = funcion[1];
//         }
        while(Dato_Recibido ==
"R"){
            digitalWrite(dirpin,HIGH)
;
            digitalWrite(stepPin,HIGH
); // las intruccion es que se
encuentran dentro del lazo
            delayMicroseconds(50);
            // son las que aran

```

```

que nuestro motor se mueva ,es la
parte donde van los pulsos
        digitalWrite(stepPin,LOW)
; // necesarios para que el
motor se mueva
            delayMicroseconds(50);
        }

//         if(Sensor_12bits -
Displacement_Incoming < 0) giro =
false;
//         else giro = true;
            digitalWrite(dirpin, giro);
            EnviarDato(funcion[1]);
            Serial.println(Sensor_12bit
s - Displacement_Incoming);
            int n = abs(Sensor_12bits -
Displacement_Incoming)*10;
            n = 200;
            for(int i = 0; i< 200;
i++){
                for(int x = 0; x < 80;
x++){ // creamos un lazo for ,
en nuestro caso el motor es de
3200 pasos, para dar una vuelta
!
                    digitalWrite(stepPin,HIGH); // las intruccion es que se
encuentran dentro del lazo
                    delayMicroseconds(50);
                    // son las que aran
que nuestro motor se mueva ,es la
parte donde van los pulsos
                    digitalWrite(stepPin,LOW); // necesarios para que el
motor se mueva
                    delayMicroseconds(50);
                }

                for(int i = 0; i < 100;
i++){
                    Sensor_12 =
analogRead(Sensor) + Sensor_12;
                }
                    Sensor_12 =
Sensor_12/100;

                    int x = 1;
                    if(giro) x = -1;
                    if(abs(aux - Sensor_12) >
100){
                        recta = recta + 70;
                    }else recta = recta +
x*abs(aux - Sensor_12);
                    aux = Sensor_12;
                    Sensor_12 = 0;
                    delay(3000);
                }
            }
        }
    }
}

```

```

    }

    giro = !giro;
    Sensor_12bits =
    Displacement_Incoming;
    EnviarDato(funtion[0]);
    }
    Dato_Anterior =
    Dato_Recibido;
    Serial.print(Dato_Recibido+"
" + String(Sensor_12bits)+
" ");
    Serial.println(String(aux) +
" " + String(recta));
    button1.pressed = false;
    }
}

```

- Funciones Realizadas

```

float readBattery(){
    Estado_Bateria = 0;
    for(int i = 0; i < 100; i++){
        Estado_Bateria =
        Estado_Bateria +
        analogRead(Bateria);
    }
    return Estado_Bateria =
    ((1.05672*2.00)*Estado_Bateria/10
    0)*(3.30/4096);
}

// Callback when data is received
void OnDataRecv(const uint8_t *
mac, const uint8_t *incomingData,
int len) {
    memcpy(&Informacion_Entrante,
incomingData,
sizeof(Informacion_Entrante));
    Serial.print("Bytes received:
");
    Serial.println(len);
    Dato_Recibido =
    Informacion_Entrante.Mensaje;
    Displacement_Incoming =
    Informacion_Entrante.Displacement
;
}

// Callback 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");
    if (status == 0){
        success = "Delivery Success
:);";
    }
    else{
        success = "Delivery Fail :(";
    }
}

```

```

void EnviarDato(String estado){
    // Set values to send
    Informacion_Saliente.Sensor_Val
ue = Sensor_12bits;
    Informacion_Saliente.Status =
estado;
    Informacion_Saliente.Battery =
Estado_Bateria;
    // Send message via ESP-NOW
    esp_err_t result =
    esp_now_send(broadcastAddress,
    (uint8_t *)
    &Informacion_Saliente,
    sizeof(Informacion_Saliente));

    // if (result == ESP_OK) {
    //     Serial.println("Sent with
success");
    // }
    // else {
    //     Serial.println("Error
sending the data");
    // }
}

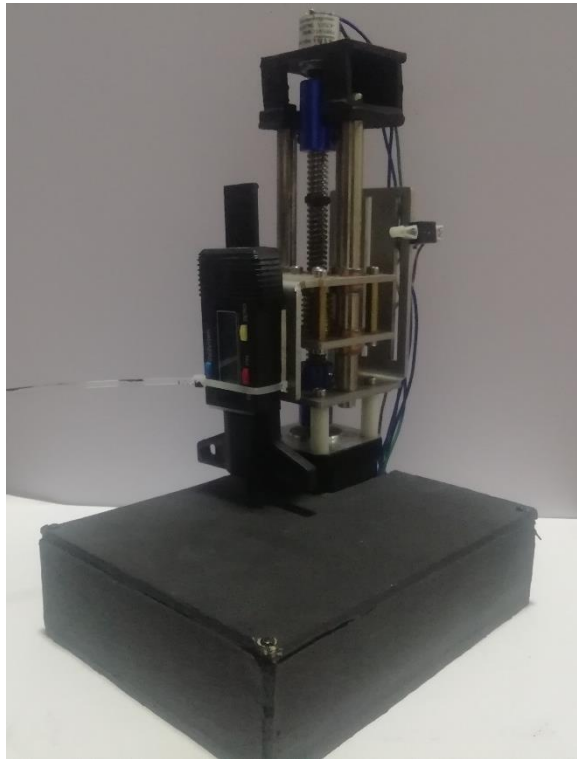
```

```

void Inicializar(){
    pinMode(steppin,OUTPUT); //
declaramos como salidas
    pinMode(dirpin,OUTPUT); //
declaramos como salida
    for(int i = 0; i < 3; i++){
        pinMode(Resolution[i],
OUTPUT);
        digitalWrite(Resolution[i],
HIGH);
    }
    pinMode(button1.PIN,
INPUT_PULLUP);
    attachInterrupt(button1.PIN,
isr, RISING);
    // Init Serial Monitor
    Serial.begin(115200);
}

```

Anexo 5. Módulo de desplazamiento.



Anexo 6. Módulo de control.



## Anexo 7. Parte interna del módulo de control.

