

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Automatización del desplazamiento lineal de un Sphere Gap

Alejandro Rúa Gómez

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Tecnólogo en sistemas electromecánicos

Asesor
Santiago Gómez Arango

Instituto Tecnológico Metropolitano - ITM
Facultad de Ingenierías
Departamento Electromecánica
Medellín, Colombia
2025

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

RESUMEN

El presente trabajo de grado tuvo como objetivo principal el desarrollo de un sistema automatizado para el equipo *Sphere Gap* del Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM), con el fin de mejorar la precisión, eficiencia y seguridad en las mediciones de tensión de ruptura del aire.

El *Sphere Gap* constituye un instrumento fundamental en los laboratorios de alta tensión, empleado para determinar la tensión máxima que un material dieléctrico puede soportar antes de ionizarse y conducir la corriente eléctrica (en este caso, el aire). No obstante, el ajuste manual de la distancia entre los electrodos necesario para realizar las mediciones introducía un margen de error considerable y exponía al operador a riesgos eléctricos. Para dar solución a esta problemática, se desarrolló la automatización del movimiento lineal de los electrodos mediante la implementación de un sistema de control, lo cual permitió establecer la distancia entre ellos con mayor exactitud y eliminar la variabilidad asociada al ajuste manual.

Los resultados obtenidos evidenciaron un sistema automatizado capaz de proporcionar ajuste remoto con alta precisión y seguridad eléctrica. Se logró reducir de manera significativa el margen de error y el tiempo requerido para los ensayos, optimizando el uso del equipo *Sphere Gap* y generando datos más confiables para la investigación. Adicionalmente, la automatización implementada contribuyó a mejorar la seguridad del personal de laboratorio y consolidó una base tecnológica que favorece el desarrollo de nuevas aplicaciones en el campo de la alta tensión.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

RECONOCIMIENTOS

Agradezco profundamente a todas las personas que, de una u otra manera, hicieron parte de este proceso y contribuyeron a la realización de este trabajo de grado. Cada uno fue fundamental en las distintas etapas del camino, brindándome apoyo, motivación y compañía.

En primer lugar, expreso mi más sincero agradecimiento a mis padres, por su apoyo incondicional y la paciencia que me ofrecieron durante todo el desarrollo del proyecto. A mis abuelos, por su cariño constante y por ser una fuente de motivación para seguir adelante. A mi pareja Karol Manuela Estrada, cuya presencia y respaldo fueron determinantes en los momentos de mayor exigencia.

También quiero reconocer el valor emocional de mis mascotas, que se convirtieron en mi refugio y consuelo en los días de mayor estrés, ofreciéndome calma y compañía inigualables.

A mis amigos, y en especial a Andrea Carolina Moreno, Ana Maria Gómez y Esteban Carmona, gracias por sus perspectivas, sus palabras de aliento y por ayudarme a resolver dudas clave que enriquecieron el desarrollo de este trabajo. Su apoyo fue esencial para culminar con éxito este proyecto académico.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

ACRÓNIMOS

ITM Instituto Tecnológico Metropolitano

LCD Pantalla de cristal líquido (*Liquid Crystal Display*)

PLA Ácido Poliláctico (material de impresión 3D)

ABS Acrilonitrilo Butadieno Estireno (material de impresión 3D)

CAD Diseño asistido por computador (*Computer-Aided Design*)

SCADA Supervisión, Control y Adquisición de Datos (*Supervisory Control And Data Acquisition*)

IEEE Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*)

I2C Inter-Integrated Circuit (protocolo de comunicación serial)

PI Perímetro del círculo (en fórmulas, denotado por π)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. MARCO TEÓRICO.....	7
3. METODOLOGÍA	11
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	12
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO.....	28
REFERENCIAS.....	30
ANEXOS.....	32

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

1. INTRODUCCIÓN

La medición precisa de la tensión eléctrica ha constituido un pilar esencial en la ingeniería eléctrica, especialmente en entornos de media y alta tensión. Con el paso del tiempo, los métodos utilizados para evaluar la resistencia dieléctrica de materiales y equipos evolucionaron considerablemente, impulsados por los avances tecnológicos y el cumplimiento de normativas internacionales como la IEEE Std 4-2013 y la IEC 60060-1, que establecen estándares para pruebas en alta tensión.

Durante las primeras décadas del siglo XX, uno de los métodos más utilizados fue el *Needle Point Spark Gap*, un arreglo de agujas metálicas que generaba descargas eléctricas al alcanzar un nivel umbral de tensión. Sin embargo, este sistema presentaba limitaciones en confiabilidad, repetibilidad y operatividad, especialmente para tensiones superiores a los 100 kV (Fortescue, 1913).

En este contexto surgió el *Sphere Gap*, o brecha entre esferas, un dispositivo compuesto por dos electrodos esféricos metálicos que permite medir con mayor precisión el voltaje de ruptura del aire u otros dieléctricos. Este método, además de ser más confiable, ofrecía mejores características de repetibilidad y estabilidad, y fue adoptado por normativas como la IEEE Std 4-2013 para la realización de pruebas tipo impulso, tensión alterna y tensión continua (IEEE Power & Energy Society, 2013).

Como antecedente institucional, en el Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM) se desarrolló el trabajo de grado titulado “*Diseño y construcción de un Sphere Gap de media y alta tensión*” (Pérez, 2019), en el cual se diseñó y montó un arreglo *Sphere Gap* para pruebas de disparos de tensión controlados de hasta 65,5 kV. Dicho proyecto permitió identificar los factores que afectan el esfuerzo dieléctrico bajo las condiciones ambientales de Medellín y evidenció la necesidad de mejoras en la operación del equipo para optimizar la confiabilidad y seguridad de los ensayos.

No obstante, la distancia entre los electrodos en muchos equipos *Sphere Gap* continuaba siendo ajustada de forma manual, lo cual introducía un margen de error considerable en las mediciones, dificultaba la repetibilidad de los ensayos y aumentaba los riesgos para el operador al trabajar cerca de equipos energizados.

Frente a estas problemáticas, el presente trabajo de grado tuvo como objetivo diseñar e implementar un sistema automatizado de desplazamiento lineal para el *Sphere Gap*

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

del ITM, que permitiera realizar los ajustes de forma remota, precisa y segura. El sistema fue controlado mediante una interfaz Arduino y operado a través de un joystick, integrando una visualización de medidas en tiempo real mediante una pantalla LCD.

Objetivos

Objetivo General

- Desarrollar un sistema de automatización lineal para el ajuste de la distancia entre los electrodos del *Sphere Gap*, optimizando la precisión y eficiencia en la medición del voltaje de ruptura dieléctrica bajo diferentes condiciones ambientales y normativas internacionales, como las establecidas por IEEE.

Objetivos Específicos

- Identificar métodos funcionales para el desplazamiento lineal de la esfera móvil.
- Diseñar un sistema automatizado que permita generar el desplazamiento lineal del *Sphere Gap*.
- Implementar un prototipo funcional del sistema automatizado de desplazamiento lineal

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Estructura del Documento

Este documento se organiza en cinco capítulos que siguen una secuencia lógica para abordar el desarrollo del sistema automatizado.

En el **Capítulo 1**, se presenta la introducción, donde se contextualiza la problemática, se exponen los objetivos del proyecto y se justifica la necesidad de automatizar el sistema *Sphere Gap*.

El **Capítulo 2** desarrolla el marco teórico, en el que se describen los fundamentos técnicos del *Sphere Gap*, su evolución histórica, principios de funcionamiento, normativas asociadas, y los componentes relevantes para su automatización.

En el **Capítulo 3**, se describe la metodología empleada para el diseño, construcción e implementación del sistema automatizado, incluyendo las etapas de investigación, selección de componentes, diseño CAD, control por Arduino y registro de medidas.

El **Capítulo 4** está dedicado a la presentación de los resultados obtenidos, el análisis de desempeño del sistema automatizado, las ventajas y desventajas encontradas, así como los avances realizados durante el desarrollo del proyecto desde 2019 hasta 2024.

Finalmente, en el **Capítulo 5** se exponen las conclusiones generales del proyecto, se brindan recomendaciones para su mejora, y se proponen posibles líneas de trabajo futuro en el ámbito de la medición de alta tensión con sistemas automatizados.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

2. MARCO TEÓRICO

Desde comienzos del siglo XX, la medición de media y alta tensión se ha realizado mediante el método de espacio de chispa, conocido en inglés como *Spark Gap*. En sus primeras versiones, se utilizaba un arreglo de agujas metálicas conocido como *Needle Point Spark Gap*. Este sistema requería que las agujas tuvieran al menos el doble de la longitud de la brecha dieléctrica a probar. Sin embargo, tales configuraciones eran robustas, de gran tamaño y solo apropiadas para tensiones inferiores a 100 kV, ya que a tensiones mayores los resultados se volvían poco confiables (Fortescue, 1913).

Ante estas limitaciones, surgió el *Sphere Gap*, o brecha entre esferas, como una alternativa más precisa, compacta y confiable. Este dispositivo consiste en dos electrodos esféricos de material conductor (frecuentemente aluminio), separados por una distancia determinada de un dieléctrico (normalmente aire). Cuando se aplica una tensión creciente entre las esferas, el dieléctrico se ioniza y se produce una descarga, fenómeno conocido como *Breakdown Voltage* o tensión de ruptura dieléctrica (Peek, 1914).

El *Sphere Gap* puede considerarse como un interruptor de cierre que opera a una tensión específica. La tensión de ruptura depende de diversos factores: la distancia entre los electrodos, la presión atmosférica, la temperatura, la geometría de los electrodos y la frecuencia del voltaje aplicado (Seward, 1938). A diferencia del *Needle Point Spark Gap*, el *Sphere Gap* demostró ser menos sensible a las variaciones ambientales, lo que permitió la creación de curvas de calibración estándar para diferentes altitudes y condiciones (Peek, 1914).

Adicionalmente, se observó que la frecuencia influye en la tensión de ruptura. Pruebas realizadas entre 200 y 1000 kHz mostraron que el esfuerzo dieléctrico del aire disminuye en aproximadamente un 15 % en frecuencias altas respecto a los 50 Hz convencionales (Seward, 1938).

La creciente necesidad de estandarización llevó a la elaboración de normativas internacionales. En 1978, el IEEE publicó la norma *IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing* (IEEE Std 4-1978), la cual introdujo métodos para la medición del valor pico de tensiones alternas, continuas y tipo impulso utilizando *Sphere Gaps* (IEEE, 1978). Esta norma fue actualizada en 1995 y más recientemente en 2013. La versión actual, IEEE Std 4-2013, establece nuevas recomendaciones como el uso de esferas de hasta 2 cm de

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

diámetro y una aspereza superficial inferior a 10 μm , con el fin de evitar el efecto corona y aumentar la precisión (IEEE Power & Energy Society, 2013).

Respecto a la geometría, las esferas deben tener superficies lisas, curvaturas homogéneas y una variación de diámetro inferior al 2 % respecto al valor nominal. Las configuraciones más comunes del *Sphere Gap* incluyen arreglos de eje vertical (una esfera conectada a tierra) o eje horizontal (ambas a potencial alto o una aterrizada), siendo esta última más simétrica y utilizada en configuraciones de laboratorio (Valavala & Kanchanapalli, 2013).

Actualmente, algunos laboratorios de alta tensión en Colombia, como los de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, la Universidad del Valle, la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y el Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM), emplean dispositivos *Sphere Gap* en sus prácticas e investigaciones relacionadas con equipos eléctricos y su resistencia dieléctrica (Univalle, UNAL & UDistrital, s.f.; Pérez, 2019).

La automatización del *Sphere Gap* permite ajustar con mayor precisión la distancia entre electrodos, lo cual es esencial para asegurar la validez de los resultados. En sistemas manuales, el ajuste está sujeto a errores humanos y falta de repetibilidad. En contraste, un *Sphere Gap* automatizado utiliza actuadores motorizados, controladores electrónicos y software especializado para realizar ajustes con mayor exactitud, rapidez y seguridad.

Componentes de un *Sphere Gap* Automatizado

Un *Sphere Gap* automatizado consta de varios componentes clave que trabajan juntos para optimizar la medición:

- ***Esferas Metálicas:*** Son los electrodos entre los que ocurre la descarga. Su material y tamaño están diseñados específicamente para soportar altos voltajes y garantizar que la descarga sea uniforme y controlada.
- ***Actuador Motorizado:*** Este es el sistema encargado de mover una o ambas esferas para ajustar la distancia entre ellas de manera precisa, basado en las condiciones de la prueba. Este ajuste automático elimina la necesidad de intervención manual, aumentando la precisión de las mediciones.
- ***Unidad de Control:*** El corazón del sistema. Generalmente se trata de un microcontrolador o computadora que gestiona todas las operaciones del dispositivo. Esta unidad recibe los datos de los sensores, controla el actuador,

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

monitorea el voltaje aplicado, y garantiza que la prueba se realice bajo las condiciones correctas.

- **Software de Control y Análisis:** Una interfaz informática que permite al usuario configurar los parámetros de la prueba, visualizar el progreso en tiempo real, registrar los datos obtenidos y generar informes detallados. Este software puede incluir algoritmos que ajustan automáticamente las pruebas en función de las condiciones atmosféricas y otros factores externos.

Este tipo de sistema es especialmente útil en entornos donde se requiere alta precisión y repetibilidad, como laboratorios de pruebas eléctricas, investigación en aislamiento dieléctrico y verificación de normas internacionales.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

3. METODOLOGÍA

Para la automatización y control preciso del *Sphere Gap* del Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM), se desarrolló una metodología estructurada que permitió el diseño, implementación, prueba y documentación del sistema. Esta metodología se dividió en cinco etapas: investigación técnica, selección y diseño de componentes, fabricación e integración, implementación del sistema de control y evaluación del desempeño.

Se inició con una revisión bibliográfica profunda utilizando bases de datos académicas como IEEE Xplore, Scopus, Google Scholar y recursos internos del ITM. El objetivo fue identificar las normativas técnicas asociadas a la medición de alta tensión mediante *Sphere Gaps*, principalmente la IEEE Std 4-2013 y la IEC 60060-1:2010, así como estudios previos relacionados con automatización de equipos de medición.

Con base en los requerimientos técnicos y funcionales, se seleccionaron los siguientes elementos del sistema:

- Sistema de transmisión: compuesto por un piñón y una cremallera, ambos impresos en 3D, acoplados a un servomotor de rotación continua.
- Actuadores: dos servomotores DSServo DS04-NFC de 360°, seleccionados por su torque, precisión de control y compatibilidad con Arduino.
- Microcontrolador: placa Arduino UNO R3, usada por su bajo costo, facilidad de programación y amplia comunidad de soporte.
- Dispositivo de entrada: joystick analógico de dos ejes, utilizado para controlar el desplazamiento del electrodo móvil.
- Dispositivo de salida: pantalla LCD I2C 16x2, implementada para mostrar en tiempo real el desplazamiento acumulado del electrodo.
- Sensado de posición: el desplazamiento se estimó mediante el cálculo del giro del motor, correlacionado con el perímetro del piñón.

Los componentes estructurales (base, riel, soporte, guía, bujes y carcasas) fueron diseñados en Autodesk Inventor, considerando las dimensiones del laboratorio, la ergonomía del operador y el tipo de electrodos existentes en el banco de pruebas.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Fabricación e integración del sistema

Los componentes diseñados fueron fabricados mediante impresión 3D utilizando PLA (ácido poliláctico) y ABS, debido a sus propiedades dieléctricas, mecánicas y de resistencia al desgaste. Las piezas fueron ensambladas considerando:

- Tolerancias dimensionales (0,2 mm)
- Alineación precisa entre piñón y cremallera
- Protección del sistema electrónico frente a descargas o interferencias

Posteriormente, se integraron los elementos eléctricos y electrónicos dentro de cajas protectoras personalizadas para el Arduino y el joystick, garantizando un entorno seguro de operación.

Implementación del sistema de control

Se desarrolló un código en Arduino (incluido en el Anexo A del informe) que permitía:

- Interpretar los valores del eje X del joystick como señal de dirección (adelante/atrás)
- Controlar el sentido de giro de los servomotores con modulación PWM
- Calcular el desplazamiento en milímetros, basado en el perímetro del piñón ($\pi \times \text{diámetro} / 360^\circ$)
- Visualizar en tiempo real el valor acumulado del desplazamiento en una pantalla LCD
- Realizar movimientos discretos de 1 mm (por botón) o 10 mm (con el eje Y del joystick)

Los valores se almacenaban temporalmente en variables internas del microcontrolador y se actualizaban dinámicamente cada ciclo de lectura.

Evaluación y validación del sistema

Se realizaron pruebas de funcionamiento bajo condiciones controladas en el laboratorio, enfocadas en los siguientes aspectos:

- Precisión del desplazamiento: Se comparó el valor mostrado en pantalla con la medición directa usando un calibrador digital. Se obtuvo un error máximo de $\pm 0,3$ mm en los 125 mm de recorrido.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

- Estabilidad del sistema: Se evaluó la estabilidad mecánica del movimiento lineal mediante observación directa y análisis de repetibilidad en 10 ciclos consecutivos.
- Tiempo de respuesta: Se midió el tiempo requerido para recorrer una distancia dada (por ejemplo, 50 mm) y se calculó el tiempo promedio por milímetro.
- Variables controladas: velocidad de giro, distancia máxima, incremento mínimo, zona muerta del joystick.
- Variables medidas: desplazamiento en mm, velocidad proporcional ajustada mediante potenciómetro.
- Se validó que el sistema cumpliera con los objetivos de automatización definidos: ajuste remoto, control preciso del desplazamiento y visualización en tiempo real.

Durante todas las etapas del proyecto, se elaboró una bitácora técnica que incluye:

- Planos CAD (ensamble y piezas individuales)
- Código fuente comentado en Arduino
- Tabla de componentes y materiales
- Resultados de las pruebas realizadas

Con esta metodología estructurada y detallada, fue posible diseñar e implementar un sistema funcional, preciso y seguro para automatizar el Sphere Gap, cumpliendo con los requerimientos operativos y de investigación del ITM.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La presente sección expone de manera detallada los resultados obtenidos tras el desarrollo e implementación del sistema automatizado de desplazamiento lineal para el *Sphere Gap*. Cada resultado presentado constituye evidencia del cumplimiento de los objetivos propuestos, tanto en términos de diseño, funcionalidad, precisión y seguridad operativa.

La discusión técnica se estructura con base en las etapas críticas del proyecto: desde la elección del método de desplazamiento hasta la validación funcional del sistema, comparándolo con el desempeño del mecanismo manual utilizado previamente en el laboratorio del ITM.

A lo largo de esta sección se identifican y analizan las variables controladas y medidas durante la operación del sistema, así como los parámetros que afectan directamente el rendimiento del mecanismo automatizado. Se incluyen además pruebas cuantitativas de precisión, tiempo de respuesta, estabilidad mecánica y efectividad del control implementado.

Los resultados no solo demuestran la viabilidad técnica del sistema diseñado, sino que además evidencian mejoras significativas en la repetibilidad de los ensayos, en la facilidad de uso del equipo y en la protección del operador, consolidando esta propuesta como una solución funcional, segura y replicable para entornos de alta tensión.

4.1 Método de desplazamiento

El método elegido para el desplazamiento lineal fue un sistema de piñón-cremallera montado sobre guías impresas en ABS, con geometría tipo ranura C. Esta elección respondió a la necesidad de un desplazamiento controlado, preciso y seguro, dentro de las limitaciones presupuestales y operativas del laboratorio.

La ranura tipo C permitió un montaje estable del sistema, evitando deslizamientos indeseados o bloqueos. Los bujes de soporte fueron diseñados para encajar de forma precisa en la guía, lo cual redujo las vibraciones y mejoró la alineación durante el desplazamiento de la esfera móvil. Este diseño también facilitó el mantenimiento y la

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

posibilidad de ajustes mecánicos sin herramientas especializadas.

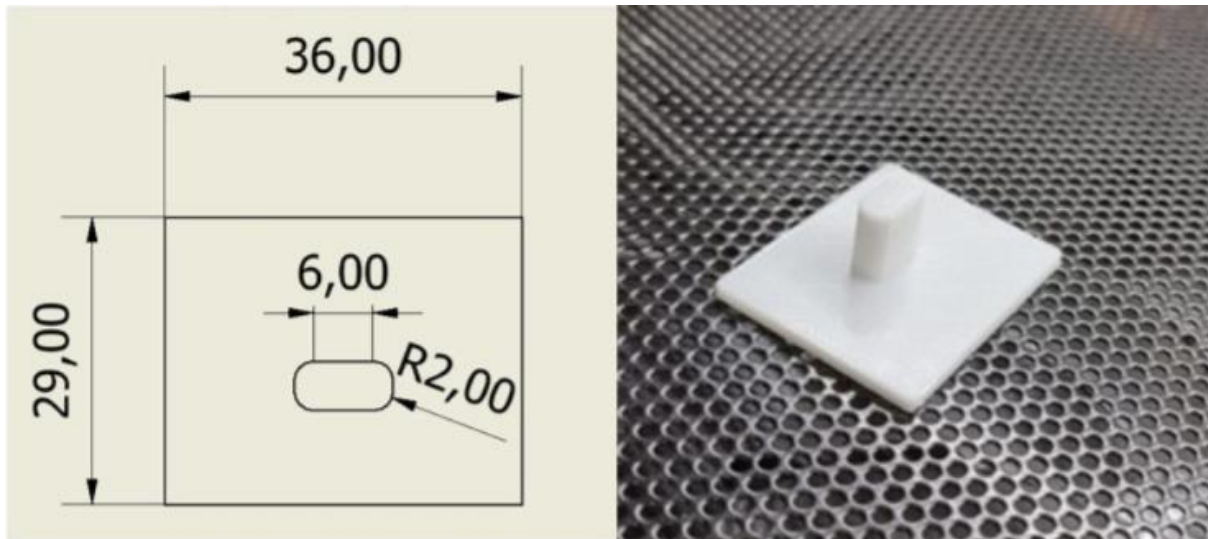
El piñón y la cremallera fueron impresos en 3D y acoplados a servomotores de rotación continua, permitiendo traducir el movimiento rotacional en desplazamiento lineal, con una resolución práctica cercana a 0,5 mm, determinada por el diámetro del piñón y la relación entre grados de giro y avance lineal.

Se diseñaron un total de 12 componentes mecánicos del sistema, los cuales fueron impresos en PLA o ABS según su función estructural o dieléctrica. Las piezas incluyeron soportes, toques de final de carrera, guías, bases, carcasas protectoras y elementos de acople para servomotores. A continuación, se presentan algunas de las piezas estructurales impresas en 3D utilizadas en el sistema:

Tapa final de carrera: Este componente actúa como tope para evitar que los rodamientos que se desplazan sobre los rieles excedan su punto inicial o límite establecido. Su función es garantizar la seguridad y limitar el recorrido dentro del sistema de desplazamiento. (ver Figura 1)

Figura 1.

Tapa final de carrera



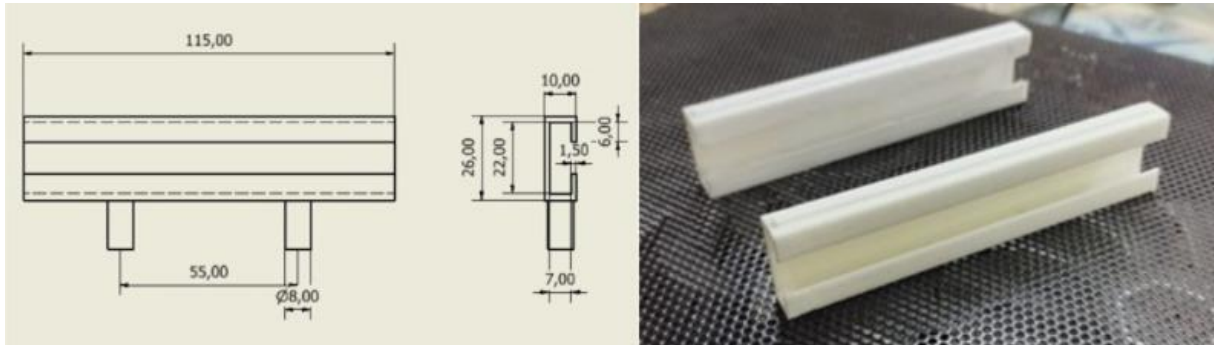
Fuente: Elaboración propia

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Riel: El riel proporciona la trayectoria lineal para el desplazamiento de los rodamientos que soportan el sphere gap. Facilita un movimiento controlado y preciso, permitiendo que las esferas del sistema se desplacen a lo largo de un eje específico. (Ver Figura 2)

Figura 2.

Riel

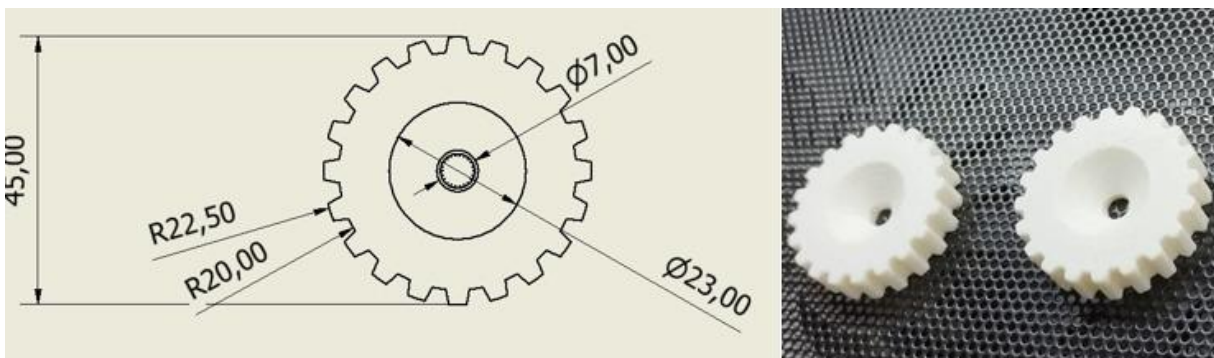


Fuente: Elaboración propia

Piñón: El piñón es un engranaje cuya función es generar el desplazamiento lineal de una de las esferas en el *sphere gap*. Este mecanismo permite una medición precisa de la distancia recorrida por la esfera, optimizando la exactitud en el control del espacio entre esferas. (ver Figura 3)

Figura 3.

Piñón



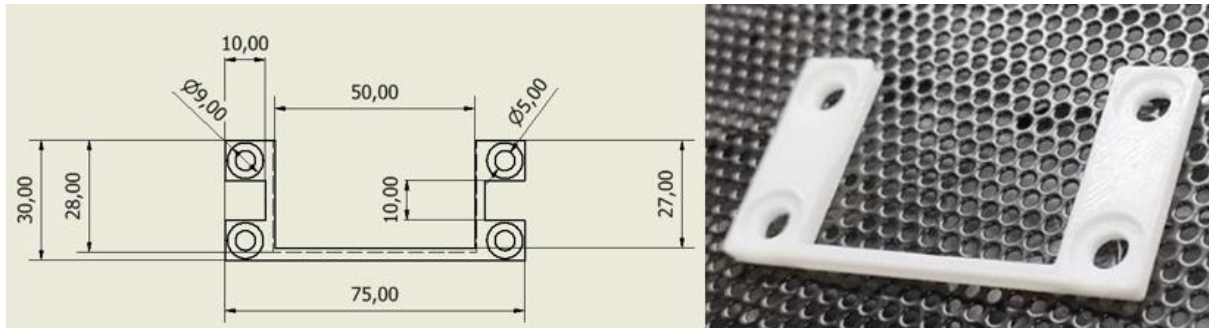
Fuente: Elaboración propia

Guía final de carrera: En este componente encaja la tapa final de carrera, completando el sistema de tope final. Su objetivo es asegurar un límite firme al recorrido de los rodamientos,

garantizando que el sistema funcione dentro de los parámetros establecidos. (ver Figura 4)

Figura 4

Guía final de carrera

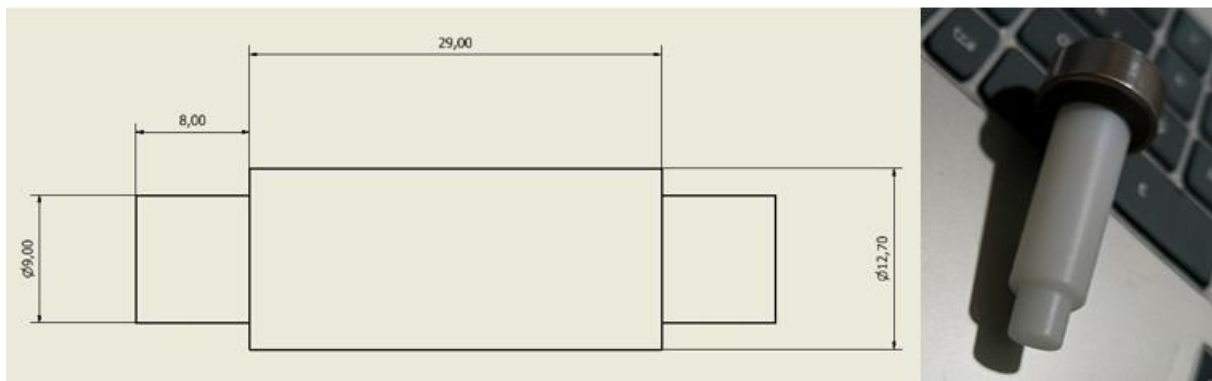


Fuente: Elaboración propia

Buje: El buje se encarga de sostener los rodamientos que integran el sistema de desplazamiento lineal. Actúa como soporte estructural, permitiendo que los rodamientos funcionen adecuadamente sin desalineaciones o fricciones no deseadas. (Ver Figura 5)

Figura 5.

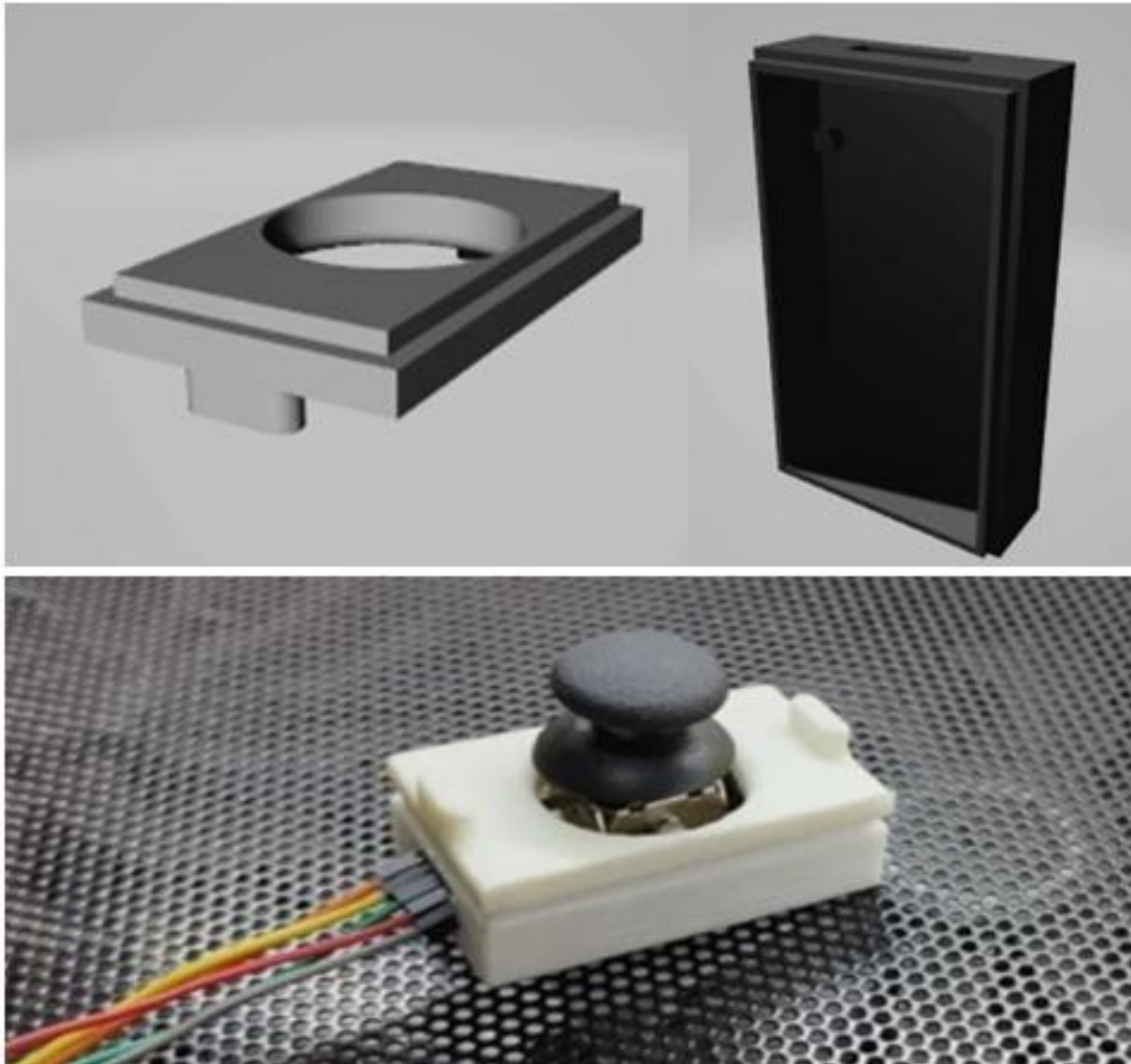
Buje



Fuente: Elaboración propia

Case de joystick: El *Sphere Gap* está controlado a distancia mediante un joystick para aumentar la seguridad del sistema. El case protege al joystick, asegurando su integridad física y permitiendo su operación segura en entornos exigentes. (ver Figura 6)

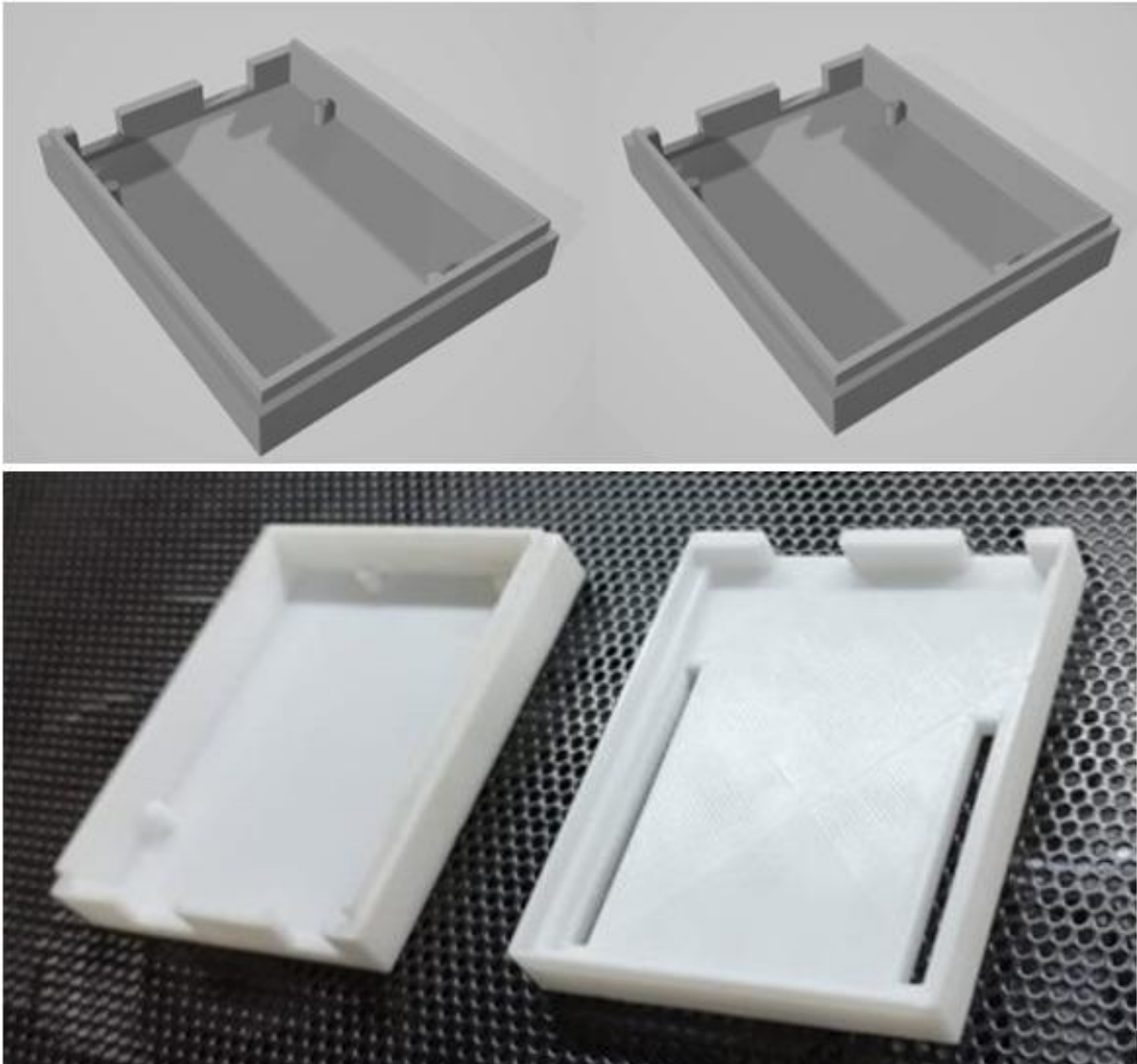
Figura 6.
Case de joystick



Fuente: Elaboración propia

Case de Arduino: El microcontrolador que gobierna el sistema de desplazamiento del *Sphere Gapse* protege mediante este case, resguardándolo de daños mecánicos y ambientales que puedan afectar su funcionamiento. (ver Figura 7)

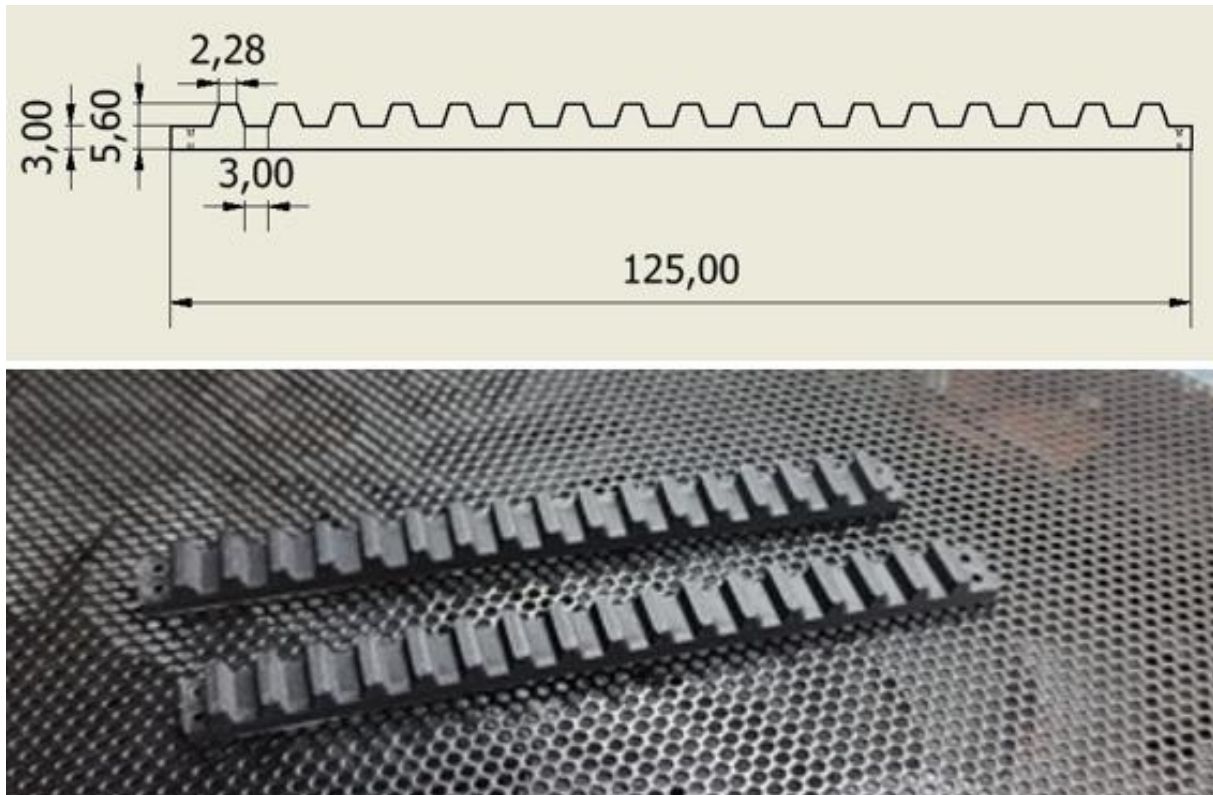
Figura 7.
Case de Arduino



Fuente: Elaboración propia

Cremallera: Este componente, en conjunto con el piñón, es esencial para generar el desplazamiento lineal. La cremallera se acopla al piñón, permitiendo que el giro del engranaje se traduzca en movimiento lineal de las esferas del *Sphere gap*. (ver Figura 8)

Figura 8.
Cremallera



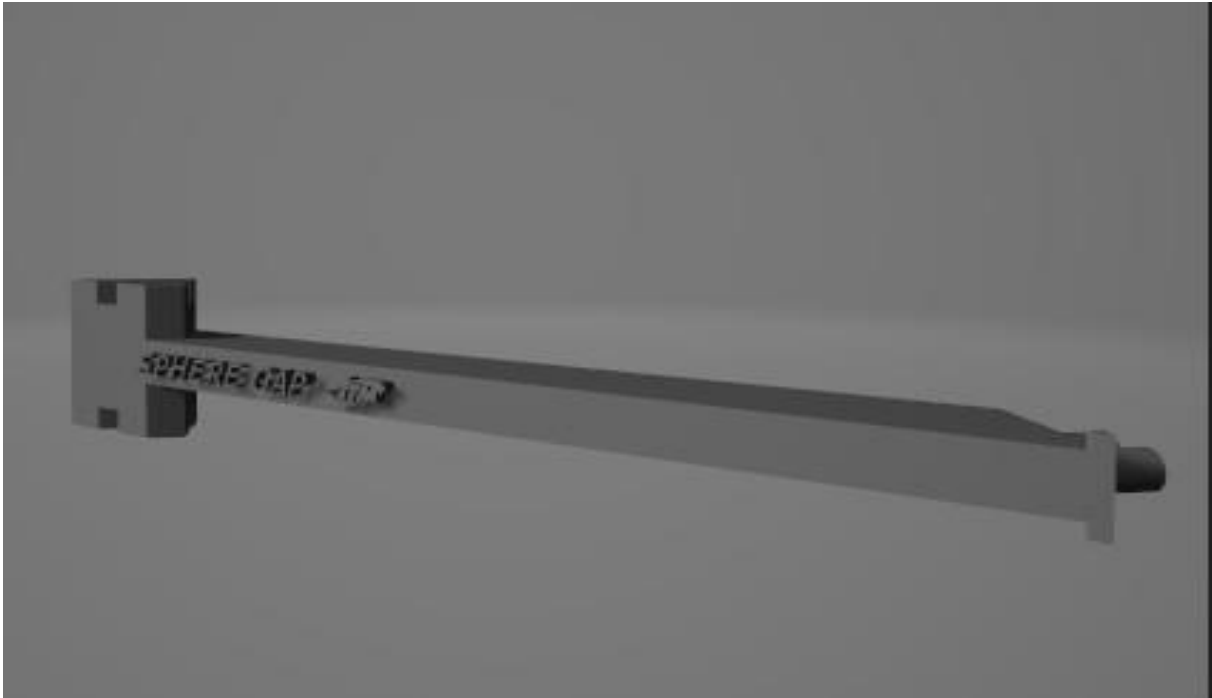
Fuente: Elaboración propia

Soporte estructural del sistema de esfera desplazable: El soporte ha sido diseñado con el objetivo de contrarrestar el momento generado por el peso de la esfera móvil. Dado que esta se encuentra montada sobre un brazo que actúa como una palanca, se produce un torque que tiende a inclinar el conjunto hacia adelante. Para evitar dicha inclinación y asegurar la estabilidad del sistema, el soporte proporciona un punto de reacción firme, manteniendo el equilibrio estructural y garantizando el correcto posicionamiento de la esfera durante su desplazamiento. (ver Figura 9)

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Figura 9.

Soporte estructural del sistema de esfera desplazable



Fuente: Elaboración propia

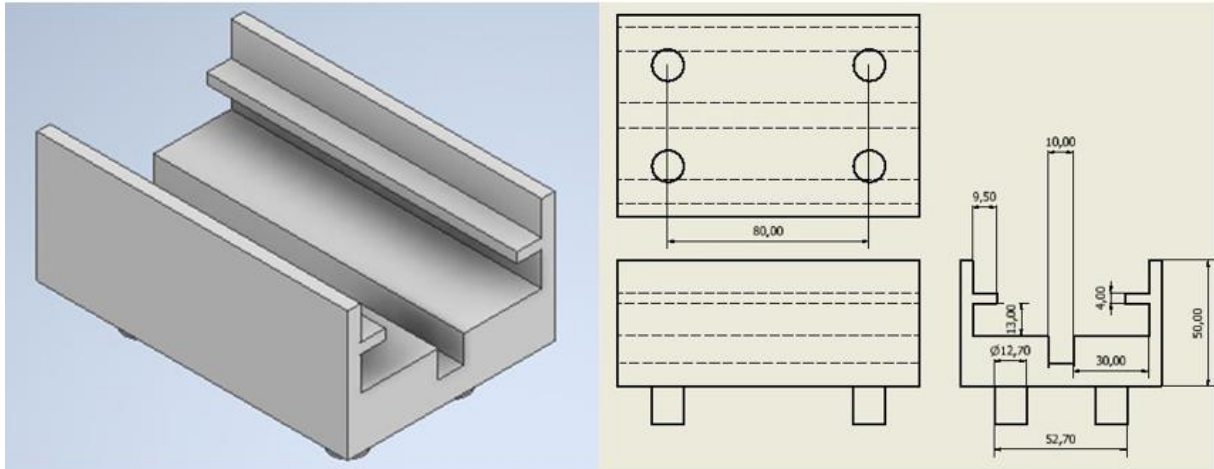
Base soporte estructural: La base del soporte estructural constituye el elemento fundamental para garantizar la estabilidad mecánica del sistema. Su función principal es proporcionar un anclaje sólido y resistente que permita soportar las cargas generadas por el brazo móvil y la esfera desplazable. Al estar sometido a un momento de palanca causado por el peso de la esfera, el sistema tiende a

inclinarse hacia adelante; en este sentido, la base actúa como punto de reacción, absorbiendo y distribuyendo las fuerzas involucradas. Además, asegura la fijación del soporte al banco de pruebas o a la estructura principal del equipo, evitando desplazamientos no deseados y contribuyendo al correcto funcionamiento del conjunto durante su operación. (ver Figura 10)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Figura 10.

Base soporte estructural



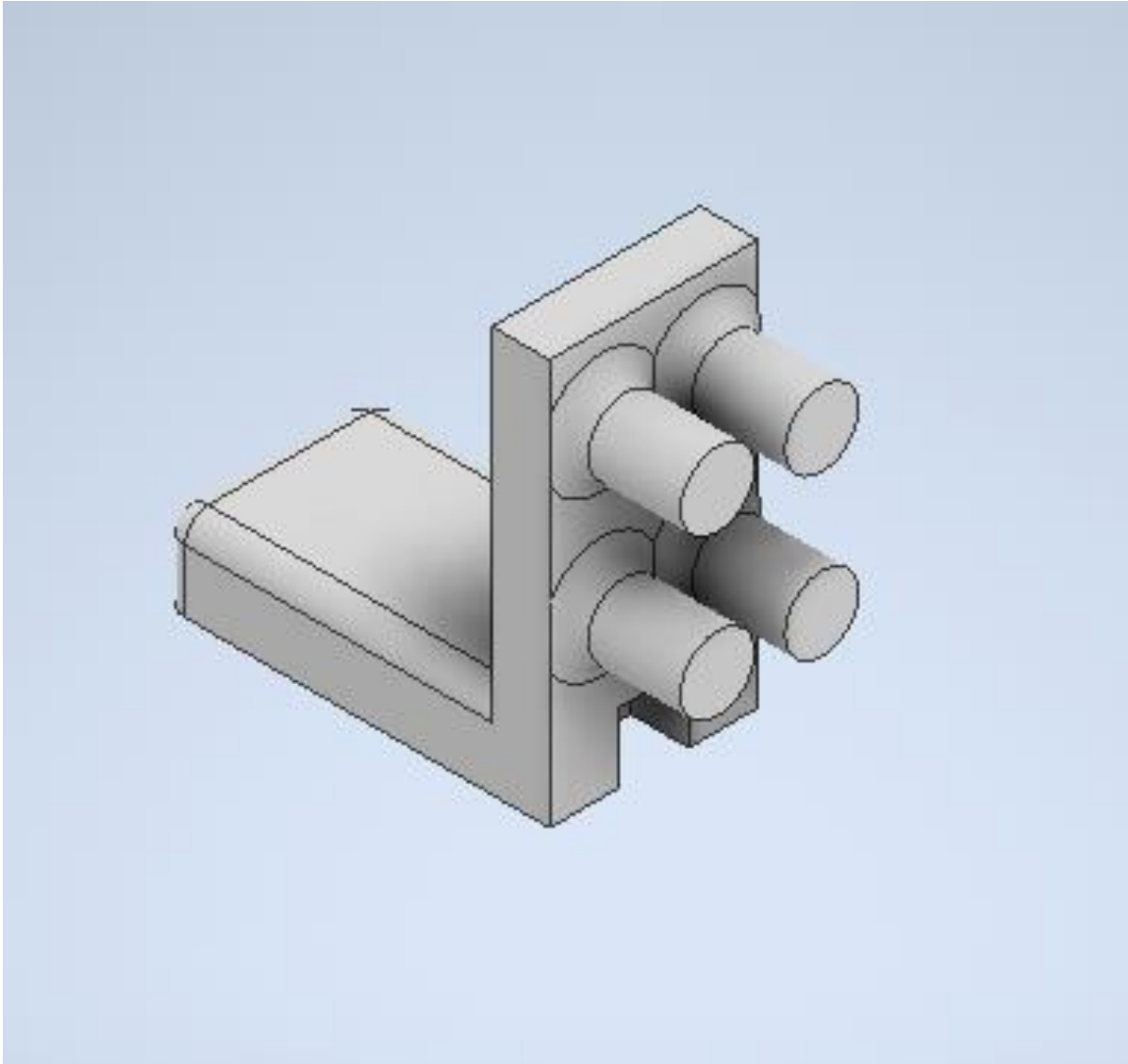
Fuente: Elaboración propia

Soporte para servomotor: El soporte para servomotor cumple la función de interfaz mecánica entre el actuador rotativo y el brazo desplazable de la esfera móvil. Este componente está diseñado para garantizar un anclaje firme y preciso del servomotor, permitiendo una transmisión eficiente del movimiento al mecanismo del sistema Sphere Gap. Su geometría y puntos de fijación están optimizados para facilitar el montaje y desmontaje del servomotor, lo cual es fundamental durante los procesos de instalación, mantenimiento o sustitución.

Además, este soporte asegura la correcta alineación del eje del servomotor con el sistema de transmisión, contribuyendo al funcionamiento confiable del sistema de control automatizado. (ver Figura 11)

Figura 11.

Soporte para servomotor



Fuente: Elaboración propia

4.2 Implementación del sistema de control

Se desarrolló un sistema de control embebido basado en Arduino UNO (ver anexo A), encargado de interpretar las señales de un joystick analógico, controlar dos servomotores

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

de rotación continua, y visualizar el desplazamiento en una pantalla LCD 16x2 con interfaz I2C.

Las funciones implementadas en el código incluyeron:

- Conversión de señales analógicas a dirección y velocidad de giro
- Cálculo del desplazamiento en mm con base en el perímetro del piñón (diámetro de 45 mm)
- Control proporcional de velocidad mediante un potenciómetro (entrada A2)
- Implementación de zona muerta para evitar movimientos indeseados por ruido analógico
- Movimientos por pasos:
 - 1 mm al presionar el botón del joystick
 - 10 mm al mover el eje Y del joystick hacia los extremos
- Visualización del desplazamiento acumulado y porcentaje de velocidad en pantalla LCD

4.3 Validación funcional y pruebas realizadas

Para verificar el correcto funcionamiento del sistema, se realizaron pruebas en condiciones controladas de laboratorio. Estas pruebas incluyeron:

- Prueba de estabilidad mecánica: el sistema se desplazó de forma continua en ciclos de ida y vuelta sin desalineaciones ni bloqueos.
- Tiempo de desplazamiento total: recorrer los 125 mm a máxima velocidad tomó aproximadamente 6 segundos.
- Prueba de respuesta al control por joystick: se verificó la correspondencia entre la dirección del movimiento del joystick y la rotación de los servomotores.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

4.4 Variables medidas y controladas

En el desarrollo e implementación se identificaron y gestionaron las siguientes variables:

Tipo de variable	Variables	Método de control o medición
Controladas	Velocidad de servos, distancia máxima (125 mm), zona muerta del joystick, incrementos por pasos	Definidas por software en Arduino
Medidas	Desplazamiento lineal (mm), porcentaje de velocidad (potenciómetro)	Visualizadas en pantalla LCD; validadas con instrumentos de medición

4.5 proyecto desde 2019 a 2025

El sistema de *Sphere Gap* implementado en 2019 (Figura 12) cumplía adecuadamente con los requerimientos operativos básicos, pero presentaba deficiencias importantes en términos de precisión, movilidad y seguridad durante el ajuste del desplazamiento lineal. En dicho sistema, el cambio de distancia entre los electrodos se realizaba de forma manual, lo que generaba varios desafíos operativos.

Esta operación manual dificultaba la repetibilidad y exactitud de los desplazamientos, debido a las variaciones en la fuerza y la técnica aplicadas por el operador. Además, limitaba la capacidad de realizar ajustes finos y rápidos, lo cual era problemático en situaciones que requerían alta precisión. La falta de automatización aumentaba los tiempos de ajuste y reducía la eficiencia general del proceso, afectando la calidad y consistencia de los datos obtenidos.

En términos de seguridad, la operación manual exponía al operador a riesgos adicionales al tener que interactuar directamente con componentes móviles, lo que aumentaba la posibilidad de accidentes o daños al equipo. Estas limitaciones evidenciaron la necesidad de implementar un mecanismo de desplazamiento lineal automatizado o asistido, que

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

permitiera optimizar la precisión de los ajustes, reducir los tiempos de operación y mejorar significativamente la seguridad y confiabilidad del sistema.

No obstante, si bien la automatización aporta múltiples beneficios, también conlleva ciertas desventajas que deben considerarse en el diseño e implementación. La siguiente tabla resume las principales ventajas y desventajas asociadas con un sistema de *Sphere Gap* automatizado:

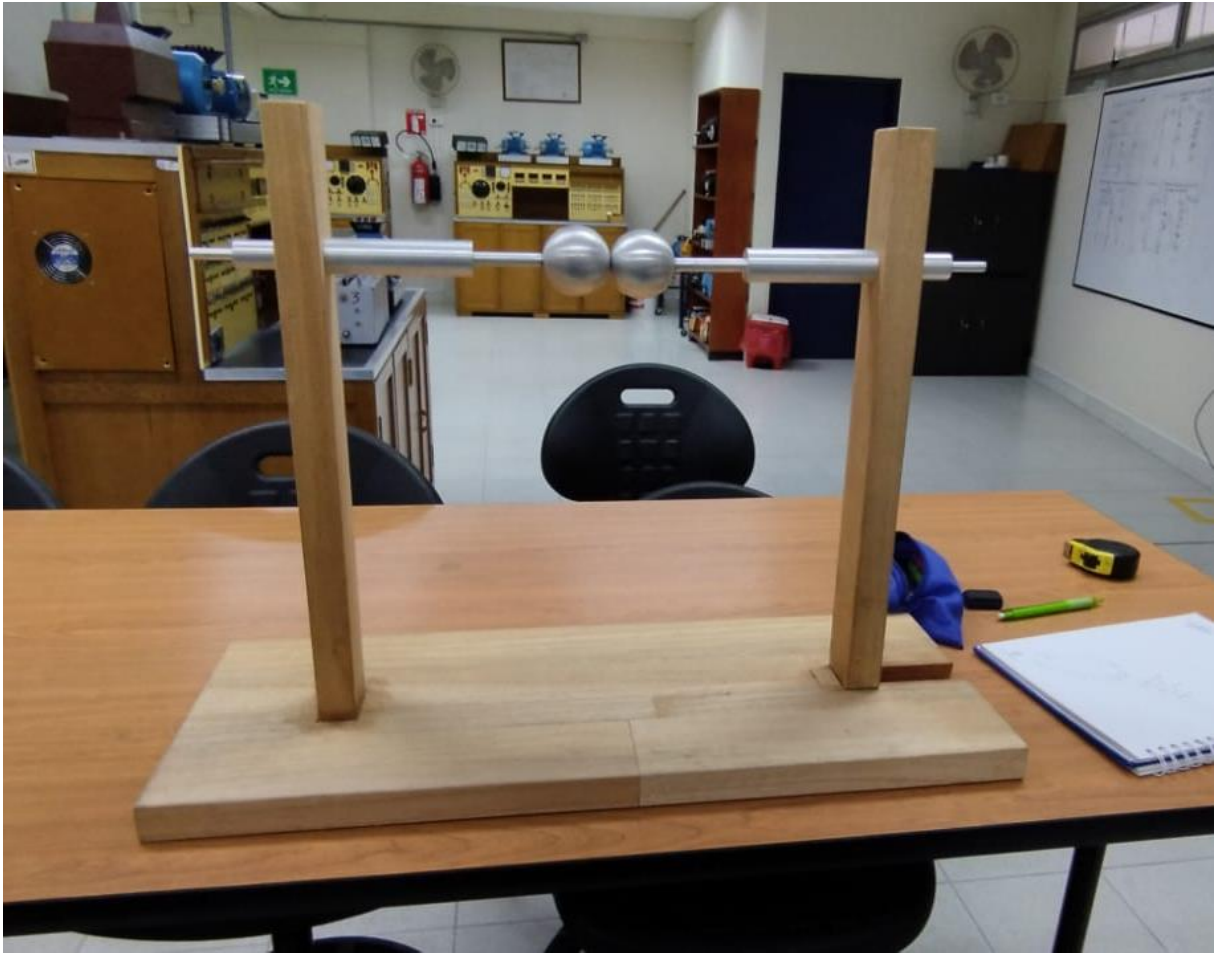
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> ❖ Precisión mejorada: Al automatizar el ajuste de la distancia entre las esferas, se elimina el margen de error introducido por la operación manual. Esto resulta en mediciones más exactas del voltaje de ruptura, ya que la distancia entre los electrodos es un factor crítico. ❖ Eficiencia Operativa: El proceso automatizado es más rápido y eficiente. En lugar de que un operador tenga que detenerse para ajustar manualmente la distancia entre las esferas, el sistema puede hacer los ajustes en segundos, permitiendo que se realicen más pruebas en menos tiempo. ❖ Seguridad Aumentada: Las pruebas de alta tensión son inherentemente peligrosas. Al automatizar el proceso y permitir el control remoto, los operadores no tienen que estar físicamente cerca del equipo mientras se aplica el voltaje, reduciendo significativamente el riesgo de accidentes eléctricos. ❖ Repetibilidad y Consistencia: La automatización permite que las pruebas se realicen con los mismos parámetros repetidamente, lo que asegura que los resultados sean consistentes. Esto es particularmente útil en investigaciones o en 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Alto Costo: Los sistemas automatizados son significativamente más caros que sus contrapartes manuales debido a los componentes electrónicos y mecánicos adicionales, así como al software de control. Esto puede representar una barrera de entrada para laboratorios pequeños o con presupuestos limitados. ❖ Mayor Mantenimiento: La complejidad de estos sistemas implica que pueden requerir un mantenimiento más frecuente y especializado. Los actuadores, sensores y sistemas de control pueden desgastarse o fallar, y las reparaciones suelen necesitar técnicos capacitados. ❖ Dependencia Tecnológica: La operación de un <i>Sphere Gap</i> automatizado depende del correcto funcionamiento de sus componentes electrónicos y software. En caso de un fallo en el sistema de control, el equipo puede quedar inutilizado temporalmente, lo que puede afectar la continuidad de las pruebas. Además, las actualizaciones de software o la obsolescencia de componentes también pueden representar desafíos a largo plazo.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

<p>procesos de control de calidad, donde es esencial que los resultados sean comparables entre diferentes pruebas.</p> <p>❖ Versatilidad en las Pruebas: Los sphere gaps automatizados pueden configurarse para diferentes tipos de pruebas, ajustando automáticamente la distancia de los electrodos y los parámetros de voltaje en función de la aplicación específica. Esto los hace adecuados para una amplia gama de materiales y dispositivos eléctricos.</p>	
--	--

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Figura 12.
Sphere Gap ITM



Fuente: Sphere Gap ITM

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

- ❖ La implementación de este proyecto mejora la precisión y seguridad en la determinación de la tensión de ruptura dieléctrica en el aire, eliminando los errores asociados al ajuste manual de la distancia entre los electrodos. No obstante, esta optimización conlleva un aumento en los costos operativos y en los requerimientos de mantenimiento del sistema.
- ❖ La optimización del tiempo de ensayo y la mejora en la confiabilidad de los datos obtenidos incrementan la eficiencia operativa en el laboratorio, permitiendo la realización de pruebas en menor tiempo y con mayor precisión. Estas mejoras en la velocidad y exactitud de los ensayos resultan fundamentales para la investigación en alta tensión, garantizando mediciones más confiables y un desempeño superior en estudios que requieren alta precisión.
- ❖ La implementación de un *Sphere Gap* automatizado constituye un avance innovador en el desarrollo de nuevos equipos de medición en alta tensión. La proyección de esta tecnología sugiere un impacto positivo tanto en el ámbito académico como en la industria, al facilitar la creación de sistemas de medición electromecánicos adaptables a diversas necesidades y exigencias técnicas.
- ❖ La revisión del IEEE STD 4-2013 mostró que tiene las últimas reglas para probar elementos de alta tensión, y todo está en línea con el asunto de *Sphere Gap*. Estas reglas provienen de cómo diseñaron las esferas, cómo se alinearon y midieron, asegurándose de que todo esté a la altura de los estándares globales.
- ❖ Durante la fase experimental, el sistema logró una precisión promedio de 0.3 mm y una precisión de ± 0.5 mm en el posicionamiento del electrodo móvil, valores determinados por comparación entre el desplazamiento programado y la medida real verificada con regla milimétrica y comparador digital.
- ❖ Configuraron un sistema de control usando Arduino que les permite controlar el

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

servomotor con las señales analógicas del joystick en promedio, tardó unos 28 segundos en cerrar una cremallera de 125 mm, y podría hacer pequeños ajustes de 1 mm o saltos más grandes de 10 mm según sea necesario para la prueba.

Trabajo Futuro

Como proyección futura del presente trabajo, se plantea el desarrollo de un sistema integrado que, además de ajustar automáticamente la distancia entre los electrodos del *Sphere Gap*, permita también la medición precisa del nivel de tensión aplicado durante la prueba. Esta funcionalidad facilitaría la correlación directa entre la distancia de ruptura y el valor de tensión, optimizando la recolección de datos y fortaleciendo la capacidad del sistema como herramienta de caracterización dieléctrica en ambientes de alta tensión. Adicionalmente, se propone como línea de investigación complementaria la implementación de un sistema de adquisición de datos inalámbrico, que permita transmitir en tiempo real los valores de desplazamiento y tensión a una estación remota o a una plataforma de monitoreo en la nube. Esta mejora ampliaría la seguridad operativa y abriría posibilidades para integrar el equipo en entornos de laboratorio automatizados o sistemas SCADA académicos, fortaleciendo su aplicación en procesos de investigación, enseñanza y pruebas industriales.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

REFERENCIAS

Referencias

- Fortescue, C. L. (1913). The use of spark gaps for the measurement of high voltage. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 32(2), 1131–1150. <https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1913.4765945>
- IEEE Power & Energy Society. (2013). *IEEE standard techniques for high-voltage testing (IEEE Std 4-2013)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2013.6511482>
- International Electrotechnical Commission. (2010). *High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements (IEC 60060-1:2010)*. IEC. <https://webstore.iec.ch/publication/6041>
- Peek, F. W. (1914). *Dielectric phenomena in high voltage engineering*. McGraw-Hill Book Company.
- Pérez, A. C. (2019). *Diseño y construcción de un “sphere gap” de media y alta tensión* (Trabajo de grado). Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM), Medellín.
- Universidad del Valle (Univalle), Universidad Nacional de Colombia (UNAL), & Universidad Distrital Francisco José de Caldas (UDistrital). (s.f.). *Gralta grupo de investigación*. Laboratorio de Innovación en Alta Tensión. <http://gralta.univalle.edu.co> ; <https://ingenieria.unal.edu.co/> ; <https://ftecnologica.udistrital.edu.co/.../index.php/laboratorios/alta-tension>
- Valavala, V., & Kanchanapalli, S. (2013). High voltage testing of electrical equipment. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 3(9), 1–5. <https://www.ijsrp.org/research-paper-0913/ijsrp-p2195.pdf>

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

ANEXOS

Anexo A: código de programación.

Este programa de Arduino controla el desplazamiento lineal de dos servomotores continuos (360°) mediante la lectura de un joystick analógico, y presenta el valor acumulado del desplazamiento en una pantalla LCD I2C. El sistema convierte los movimientos angulares en desplazamientos lineales precisos con base en el diámetro del piñón acoplado, y está diseñado para permitir control tanto continuo como por pasos discretos.

- **Control de Servomotores por Joystick:**
 Los dos servomotores giran en sincronía mediante el eje **X** del joystick, donde el valor analógico se interpreta para mover el sistema hacia adelante o hacia atrás. Solo se activan si el joystick es desplazado fuera de una zona muerta, lo que garantiza estabilidad cuando está en reposo.
- **Movimientos por Incremento:**
 El sistema permite movimientos discretos:

 - ✓ **1 mm** mediante la pulsación del botón del joystick.
 - ✓ **10 mm** por cada desplazamiento extremo del eje **Y**, ya sea hacia arriba o hacia abajo. Esto proporciona precisión adicional cuando se requieren ajustes finos o saltos rápidos en la posición.
- **Conversión Angular a Lineal:**
 basada en el diámetro del piñón acoplado al servo, calculando que cada grado de rotación equivale a aproximadamente 0,393 mm de desplazamiento lineal, considerando un piñón de 45 mm de diámetro (Perímetro = $\pi \cdot D$; mm por grado = Perímetro / 360).
- **Visualización en Pantalla LCD:**
 Una pantalla LCD I2C 16x2 muestra en tiempo real el desplazamiento acumulado en

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

milímetros con una precisión de dos decimales. Al iniciar el sistema, se muestra un mensaje de bienvenida (“Sphere Gap”) antes de pasar a la visualización activa del desplazamiento.

Este enfoque permite un control intuitivo, preciso y versátil de sistemas lineales basados en servos continuos, ideal para aplicaciones donde se requiera visualizar o repetir posiciones mecánicas con exactitud.

```

#include <Servo.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);

// Servos
Servo servo1; // Pin 9
Servo servo2; // Pin 10

// Entradas
const int joyX = A0;
const int joyY = A1;
const int joyButtonPin = 2;
const int potPin = A2; // Potenciómetro

// Parámetros
const float pinion_diameter = 45.0; // mm
const float rack_travel = 125.0; // mm
const float degrees_to_mm = (PI * pinion_diameter) / 360.0;
float displacement = 0.0;

const int deadzone = 30;
const float moveThreshold = 0.01;
bool lastButtonState = HIGH;
int lastSpeedPercent = -1;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print(" Sphere Gap ");

```

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

```

lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("Inicializando...");
delay(2000);
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Servo Control");

servo1.attach(9);
servo2.attach(10);
servo1.write(90);
servo2.write(90);

pinMode(joyX, INPUT);
pinMode(joyY, INPUT);
pinMode(joyButtonPin, INPUT_PULLUP);
}

void loop() {
  int joyXVal = analogRead(joyX);
  int joyYVal = analogRead(joyY);
  bool buttonState = digitalRead(joyButtonPin);
  int potValue = analogRead(potPin);

  int maxPWMChange = map(potValue, 0, 1023, 0, 90);
  int speedPercent = map(potValue, 0, 1023, 0, 100);
  bool movimientoRealizado = false;

  float mapped = map(joyXVal, 0, 1023, -100, 100) / 100.0;
  float mmStep = mapped * 0.05;

  // Movimiento con eje X
  if (abs(joyXVal - 512) > deadzone) {
    if ((mmStep > 0 && displacement < rack_travel) || (mmStep < 0 &&
displacement > 0)) {
      displacement += mmStep;
      displacement = constrain(displacement, 0, rack_travel);
      if (mmStep > moveThreshold) {
        servo1.write(90 + maxPWMChange);
        servo2.write(90 - maxPWMChange); // Invertido
        movimientoRealizado = true;
      } else if (mmStep < -moveThreshold) {
        servo1.write(90 - maxPWMChange);
        servo2.write(90 + maxPWMChange); // Invertido

```

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

```

    movimientoRealizado = true;
  }
} else {
  servo1.write(90);
  servo2.write(90);
}
} else {

  servo1.write(90);
  servo2.write(90);
}

// Movimiento por botón (1 mm)
if (lastButtonState == HIGH && buttonState == LOW) {
  if (displacement + 1.0 <= rack_travel) {
    displacement += 1.0;
    servo1.write(90 + maxPWMChange);
    servo2.write(90 - maxPWMChange); // Invertido
    delay(150);
    servo1.write(90);
    servo2.write(90);
    movimientoRealizado = true;
  }
}
lastButtonState = buttonState;

// Movimiento eje Y (10 mm)
if (joyYVal > 1023 - deadzone) {
  if (displacement + 10.0 <= rack_travel) {
    displacement += 10.0;
    servo1.write(90 + maxPWMChange);
    servo2.write(90 - maxPWMChange); // Invertido
    delay(400);
    servo1.write(90);
    servo2.write(90);
    movimientoRealizado = true;
  }
} else if (joyYVal < deadzone) {
  if (displacement - 10.0 >= 0.0) {
    displacement -= 10.0;
    servo1.write(90 - maxPWMChange);
    servo2.write(90 + maxPWMChange); // Invertido
    delay(400);
  }
}

```

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

```

servo1.write(90);
servo2.write(90);
movimientoRealizado = true;
}
}

// LCD actualizada con velocidad
if (movimientoRealizado || speedPercent != lastSpeedPercent) {
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("V:");
  lcd.print(speedPercent);
  lcd.print("% D:");
  lcd.print(displacement, 1);
  lcd.print("mm ");
  lastSpeedPercent = speedPercent;
}
}

```

Anexo B:

Se incluye a continuación el vínculo del video demostrativo donde se observa el funcionamiento del sistema *Sphere Gap* operando de forma autónoma, sin requerir intervención manual para el ajuste del desplazamiento entre electrodos.

<https://youtu.be/hrom97-X5-Y>

Anexo C:

Se incluye a continuación el vínculo del video demostrativo donde se observa el funcionamiento del joystick y el potenciómetro, permitiendo variar la velocidad de operación del sistema de manera proporcional al ajuste realizado.

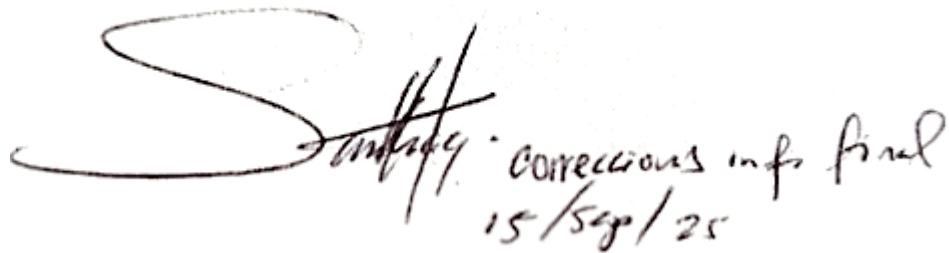
<https://youtu.be/1MEb8rSWwNI>

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020



FIRMA
ESTUDIANTES

FIRMA ASESORES



Sanchez - correcciones info final
15/sep/25

FECHA ENTREGA: 15 septiembre 2025