

CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE PROPIEDADES  
ELÉCTRICAS EN MATERIALES ÓHMICOS, UTILIZANDO PLATAFORMAS DE  
BAJO COSTO, SOFTWARE Y HARDWARE LIBRE (ARDUINO) COMO  
HERRAMIENTAS DE APOYO A LOS CURSOS BÁSICOS DE INGENIERÍA EN  
UNICATÓLICA.

JOSE DANIEL SALAZAR HERNÁNDEZ

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA CATÓLICA LUMEN GENTIUM  
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL  
SANTIAGO DE CALI  
2022

CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE PROPIEDADES ELÉCTRICAS EN MATERIALES ÓHMICOS, UTILIZANDO PLATAFORMAS DE BAJO COSTO, SOFTWARE Y HARDWARE LIBRE (ARDUINO) COMO HERRAMIENTAS DE APOYO A LOS CURSOS BÁSICOS DE INGENIERÍA EN UNICATÓLICA.

JOSE DANIEL SALAZAR HERNÁNDEZ

Trabajo de grado para optar al título de  
Ingeniero industrial

Director  
JOHN SCHNEIDER BETANCOURT RAMÍREZ  
M.Sc en ingeniería

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA CATÓLICA LUMEN GENTIUM  
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA  
PROGRAMA INGENIERÍA INDUSTRIAL  
SANTIAGO DE CALI  
2022

Nota de aceptación:

Aprobado por el Comité de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Fundación Universitaria Lumen Gentium para optar al título de: Ingeniero industrial

---

Jurado

---

Jurado

Santiago de Cali, 23 de Mayo de 2022

## DEDICATORIA

A mis padres Pedro Claver Salazar Tamayo y Gloria Hernández Villada, mi hermana María Isabel Salazar Hernández y a mi pareja Leidy Carolina Cerón Guevara por ser esos pilares que sostienen mi vida. Por todo su amor, paciencia y apoyo incondicional a lo largo de cada etapa y decisión importante en mi vida.

## AGRADECIMIENTOS

A Dios por prestarme la vida y permitirme así concluir con este objetivo.

A mi director de tesis, el Magister en ingeniería John Schneider Betancourt Ramírez y al Magister en ingeniería industrial Néstor Mauricio Castañeda Peñaranda por hacerme participe de sus conocimientos, por todo su apoyo y dedicación durante este proceso.

A todos los demás docentes que a lo largo de este camino, me brindaron sus conocimientos y me dotaron de herramientas para mi formación profesional.

Al semillero de investigación INGENIO EXACTO por abrirme sus puertas y permitirme la oportunidad de abordar este proyecto desde la experiencia de sus integrantes.

Al Centro de Excelencia en Nuevos Materiales de la Universidad del Valle, por permitirme utilizar sus instalaciones.

## CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	13
1. INTRODUCCIÓN	15
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
2.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	19
2.2 SISTEMATIZACIÓN	19
3. JUSTIFICACIÓN	21
3.1 ALCANCE	21
3.2 LIMITACIONES	22
3.3 IMPACTO SOCIAL	22
3.4 IMPACTO AMBIENTAL	23
3.5 IMPACTO ECONÓMICO	23
4. OBJETIVOS	25
4.1 GENERAL	25
4.2 ESPECÍFICOS	25
5. ESTADO DEL ARTE	26
6. MARCO REFERENCIAL	30
6.1 MARCO TEÓRICO	30
6.2 MARCO CONCEPTUAL	42

6.3 MARCO CONTEXTUAL	51
6.4 MARCO LEGAL	51
7. METODOLOGÍA	53
7.1 TIPO DE ESTUDIO	53
7.2 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN	53
7.3 FUENTES Y TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN	53
8. DESARROLLO PRIMER OBJETIVO	55
8.1 REQUISITOS DE LA FUENTE DE CORRIENTE CONSTANTE	55
8.2 REQUISITOS PARA EL HORNO RESISTIVO	55
8.3 REQUISITOS PARA LA ELECTRÓNICA DE POTENCIA DEL PROTOTIPO	56
8.4 REQUISITOS PARA EL DISEÑO DE SOFTWARE	57
9. DESARROLLO SEGUNDO OBJETIVO	62
9.1 CONSTRUCCIÓN DE LA FUENTE DE CORRIENTE CONSTANTE	62
9.2 FABRICACIÓN DE LA CÁMARA DE MUESTRAS	66
9.3 SELECCIÓN DE LA ELECTRÓNICA DE POTENCIA Y EL CONTROL PID	68
9.4 MONTAJE FINAL PROTOTIPO	72
10. DESARROLLO TERCER OBJETIVO	74
10.1 REALIZACIÓN DE MEDIDAS DE RESISTIVIDAD	74
10.2 COMPARACIÓN MEDIANTE ANÁLISIS ESTADÍSTICO	75
10.3 ANÁLISIS FINANCIERO DEL SISTEMA	78
11. CONCLUSIONES	87

12. RECOMENDACIONES	89
13. BIBLIOGRAFÍA	91
ANEXOS	96

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Conductor uniforme de longitud "l" y un área de sección transversal "A". La diferencia de potencia $\Delta V = V_b - V_a$ que se mantiene de un extremo al otro del conductor establece un campo eléctrico "E", y este campo produce una corriente "I" que es proporcional a la diferencia de potencial. ....	31
Figura 2. (a) Representación simbólica de un controlador PID, (b) representación simbólica en el dominio del tiempo y (c) representación simbólica en el dominio de Laplace. ....	36
Figura 3. Curva de respuesta del sistema frente a un escalón unitario. ....	37
Figura 4. Flujograma del funcionamiento de la fuente de corriente constante. ....	58
Figura 5. Flujograma del funcionamiento de la fuente de corriente constante. ....	59
Figura 6. Flujograma del funcionamiento del controlador PID del sistema. ....	61
Figura 7. (a) Diagrama del circuito de la fuente de corriente constante y (b) montaje prototipo de la fuente de corriente constante. ....	63
Figura 8. Diseño de PCB comercial para el sistema de mediciones. ....	63
Figura 9. Grafica de estabilidad para un tiempo de funcionamiento de 1 hora. ....	65
Figura 10. Grafica de estabilidad para diferentes valores de carga resistiva. ....	65
Figura 11. Modelado 3D correspondiente a la cámara de muestras. (a) Vista exterior y (b) Vista explosionada. ....	67
Figura 12. Resistencia tipo banda utilizada para la construcción del prototipo, 126 $\Omega$ . ....	68
Figura 13. Módulo de potencia BT 319 800E compatible con Arduino. ....	69
Figura 14. Curvas de caracterización del sistema para los valores de retardo para el control por ángulo de fase de (a) 1.043 ms, (b) 2.084 ms, (c) 4.167 ms y (d) 6.252 ms. ....	70
Figura 15. Grafica de respuesta del control PID implementado. ....	71

Figura 16. Montaje electrónico realizado para el prototipo del sistema de medición de propiedades eléctricas.....	72
Figura 17. Montaje del prototipo final del sistema de propiedades eléctricas.....	73
Figura 18. Muestra óhmica de aleación de hierro para la elaboración de graficas de resistividad en función de la temperatura. ....	74
Figura 19. Curva de resistividad en función de la temperatura para el material de pruebas seleccionado, obtenidas con el sistema de medición construido. ....	75
Figura 20. Comparación de las curvas de resistividad en función de la temperatura para el material de pruebas seleccionado, obtenidas con el sistema de medición PPMS EVERCOOL y el prototipo construido. ....	76
Figura 21. Esquema de inversión inicial y flujos de caja por periodo. ....	83

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Regla de sintonía de Ziegler y Nichols basada en la respuesta escalón del sistema. ....	38
Tabla 2. Regla de sintonía manual para controladores PID. ....	38
Tabla 3. Requerimientos técnicos para la fuente de corriente constante. ....	55
Tabla 4. Especificaciones y requerimientos para la cámara de muestras (horno).....	56
Tabla 5. Especificaciones y requerimientos para la electrónica de potencia necesaria.....	56
Tabla 6. Dimensiones geométricas de la cámara de muestras. ....	67
Tabla 7. Constantes de sintonía para el control PID (método de Ziegler - Nichols). ....	71
Tabla 8. Constantes de sintonía para el control PID (ajuste manual). ....	71
Tabla 9. Características físicas de la muestra escogida como analito de pruebas. ....	74
Tabla 10. Valores del estadístico Chi – cuadrado obtenido para las gráficas realizadas. ....	77
Tabla 11. Valores de resistividad obtenidos mediante la utilización de los sistemas de medición. ....	77
Tabla 12. Costo de materiales necesarios para la construcción del prototipo. ....	78
Tabla 13. Costo de mano de obra directa. ....	80
Tabla 14. Ingresos y costos para la venta del sistema de medición. ....	82
Tabla 15. Cálculo de la TIR para la inversión en el sistema de medición. ....	84
Tabla 16. Costos de materiales y equipos necesarios para el montaje de un sistema de mediciones de magnitudes eléctricas convencional. ....	85

## LISTA DE ANEXOS

pág.

Anexo A. Plano general del sistema de medición de propiedades eléctricas. Fuente: elaboración propia mediante software CAD Inventor 2022, licencia estudiantil. ....	96
Anexo B. Plano base del horno. Fuente: elaboración propia mediante software CAD Inventor 2022, licencia estudiantil. ....	97
Anexo C. Plano caja de circuitería. Fuente: elaboración propia mediante software CAD Inventor 2022, licencia estudiantil. ....	98
Anexo D. Plano cilindro. Fuente: elaboración propia mediante software CAD Inventor 2022, licencia estudiantil. ....	99
Anexo E. Plano resistencia tipo banda. Fuente: elaboración propia mediante software CAD Inventor 2022, licencia estudiantil. ....	100
Anexo F. Plano soporte. Fuente: elaboración propia mediante software CAD Inventor 2022, licencia estudiantil. ....	101
Anexo G. Plano tapa horno. Fuente: elaboración propia mediante software CAD Inventor 2022, licencia estudiantil.....	102
Anexo H. Plano unión. Fuente: elaboración propia mediante software CAD Inventor 2022, licencia estudiantil. ....	103

## RESUMEN

Se construyó un sistema de medición de propiedades eléctricas en materiales óhmicos, haciendo uso de plataformas de bajo costo, software y hardware libre como Arduino (marca registrada), que funcione como herramienta de apoyo para los cursos básicos de ingeniería en la Fundación Universitaria Católica Lumen Gentium. Se llevó a cabo mediante una metodología exploratoria y documental, por medio de la cual se consultaron bases bibliográficas y literatura disponible sobre la implementación de sistemas Arduino para la medición de magnitudes físicas y eléctricas en materiales óhmicos. Se realizó el levantamiento de los requerimientos con el fin de tener un punto de partida sobre el funcionamiento esperado de cada uno de los componentes macros que integran el sistema diseñado. Se construyó una cámara de muestras en acero inoxidable y se eligió la resistencia de tipo banda con la finalidad de encontrar esa sinergia entre durabilidad, rendimiento y geometría que pueda facilitar su manipulación. Se evaluó la funcionabilidad del sistema construido desde los puntos de vista técnico y financiero, con el objetivo de resaltar las ventajas de este sistema en comparación con otros dispositivos existentes en el mercado. Como resultado, se obtuvo un prototipo funcional que cumple con la finalidad de medir magnitudes eléctricas como la resistividad, de bajo costo de adquisición y mantenimiento, además de que se basa en un funcionamiento intuitivo que facilita el aprendizaje en el laboratorio de física de la universidad.

Palabras clave: Arduino, Resistividad, Control PID, Temperatura, Corriente constante.

## ABSTRAC

A system for measuring electrical properties in ohmic materials was built, using low-cost platforms, free software and hardware such as Arduino (registered trademark), which works as a support tool for basic engineering courses at the Foundation University Catholic Lumen Gentium. It was carried out through an exploratory and

documentary methodology, through which bibliographic bases and available literature on the implementation of Arduino systems for the measurement of physical and electrical magnitudes in ohmic materials were consulted. The survey of the requirements was carried out in order to have a starting point on the expected operation of each of the macro components that make up the designed system. A stainless steel sample chamber was built and the band-type resistor was removed to find that synergy between durability, performance and geometry that can make it easier to handle. The functionality of the built system was evaluated from the technical and economic point of view, with the aim of highlighting the advantages of this system compared to other devices on the market. As a result, a functional prototype was obtained that meets the purpose of measuring electrical magnitudes such as resistivity, with a low cost of acquisition and maintenance, in addition to being based on an intuitive operation that facilitates learning in the university's physics laboratory.

Keywords: Arduino, Resistivity, PID Control, Temperature, Constant current.

## INTRODUCCIÓN

La formación de los estudiantes de los programas de ingeniería tiene un componente esencial práctico el cual debe de ser suministrado por las universidades. Durante estos espacios, los conocimientos teóricos vistos en las diversas asignaturas son puestos a prueba, involucrando al estudiante en la realización de montajes experimentales, llevándolo a esas situaciones en donde debe de hacer uso de su lógica y su capacidad analítica, con el fin de dar respuesta a aquellos fenómenos que son su objeto de estudio (Capote León, Rizo Rabelo, & Bravo López, 2016). Lo anterior va muy de la mano con la metodología STEAM (*Science, Technology, Engineering, Art, Mathematics*), la cual es una metodología que combina ciencia, tecnología, ingeniería, arte y matemáticas, proponiendo una formación práctica, en donde los estudiantes llevan a cabo las diferentes fases de proyectos académicos que se dictan en los laboratorios, basados en la experimentación (Zubowicz, 2022).

Este entorno práctico, propiciado por la metodología anteriormente nombrada, necesita de equipos especializados cuyos costos son usualmente altos. Además, estos aparatos cuentan con diseños y arquitecturas cerradas que dificultan su reparación, por tal razón, muchos de los laboratorios de docencia se ven limitados en su capacidad para suministrar un entorno de prácticas óptimo para cada estudiante.

Teniendo en cuenta lo anterior, se presentó una iniciativa de investigación en la cual se plantea construir un sistema de medición de magnitudes eléctricas y adquisición de datos que haga uso de las tecnologías emergentes de plataformas embebidas, de software y hardware libre como lo es Arduino, generando así un impulso tecnológico a los laboratorios de la Fundación Universitaria Católica Lumen Gentium. A la par con el uso de este tipo de plataformas, se pueden implementar dispositivos de adquisición de datos como lo son los sensores y los controladores que posibilitan una gran variedad de experimentos de bajo costo. Todo lo anterior

con el fin de poner a disposición de los estudiantes herramientas actualizadas y competitivas para realizar las prácticas de laboratorio de las asignaturas que lo requieran.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Partiendo de (Morse & Francis, 2018) quienes afirman que “La medición es el hilo conductor que recorre el tejido de toda ciencia e ingeniería”, podemos afirmar que la medición es considerada hoy en día como base fundamental en el campo de la ciencia, la ingeniería y la innovación en cualquiera de sus ámbitos aplicables. Resulta ser una parte fundamental dentro de las acciones de control, mejora y mantenimiento en todo tipo de procesos industriales, de fabricación, en estudios y experimentos científicos, así como procesos de innovación y de mejoramiento tecnológico en cada uno de estos.

De acuerdo a lo anterior, los instrumentos de medición juegan un papel muy importante dentro de la ciencia y la ingeniería, siendo una parte esencial en la innovación, debido a que con las mediciones que estos arrojan, se pueden llevar a cabo tareas de suma importancia como, por ejemplo, el análisis estadístico para la realización de pronósticos basados en situaciones actuales y así poder realizar una toma de decisiones más acertada. Del mismo modo, estos resultados nos permiten poder caracterizar e identificar fenómenos naturales y así, darle una explicación basada en la experimentación.

En la actualidad, las carreras profesionales en ingeniería de la mayoría de las universidades en Colombia, cuentan con un enfoque orientado hacia la solución de retos logísticos, productivos y de servicio mediante técnicas innovadoras, con el fin de forjar competencias en los estudiantes para la generación de soluciones eficientes, que permitan mejorar la productividad de estos procesos y recursos necesarios en la producción de bienes y servicios. Como lo sugieren (Antivar Soto & Cárdenas Meneces, 2018), un trabajo práctico le permite al estudiante la experimentación y el descubrimiento de sus habilidades y, de esta manera, liberarse de los esquemas mentales dándole un valor agregado a su perfil profesional que lo ayudará a sobresalir del común denominador. Todo esto debido a la justificación en

la alta competitividad del mercado industrial actual y la necesidad de elevar la productividad y la calidad del producto o servicio final.

Uno de los grandes inconvenientes resulta ser que el adquirir estos equipos de medición presenta ciertos retos que van desde su costo hasta la poca disponibilidad en el mercado local. En su mayoría, los equipos necesarios para la implementación de prácticas de laboratorio o experimentos enfocados en la medición de magnitudes físicas y eléctricas, mantienen unos costos demasiado altos, dependiendo principalmente de su grado de confiabilidad y precisión a la hora de efectuar el proceso de medición. De igual forma, la gran mayoría de estos equipos deben ser importados por un tercero, lo cual aumenta considerablemente su valor final. Así mismo, otra de las desventajas de estos equipos es que manejan una arquitectura cerrada, lo que implica que son pocas las empresas y/o distribuidores los que tienen el conocimiento y las capacidades para llevar a cabo actividades de mantenimiento, reparación y calibración, lo que a su vez, termina por elevar los costos de manutención de un laboratorio especializado para este tipo de prácticas académicas.

Como lo expresan (Ordoñez, Sánchez, & Viera, 2017), la Fundación Universitaria Católica Lumen Gentium ha venido creciendo en materia de oferta académica y cantidad de estudiantes debido a los convenios establecidos con otras instituciones y a carreras con registro propio. Es por esto que se presenta la necesidad de un acondicionamiento logístico y tecnológico de los laboratorios, con el fin de brindar el ambiente adecuado que permita al estudiante la interacción con fenómenos físicos y químicos propios de las asignaturas de ciencias básicas, y así evitar que estos caigan en la obsolescencia. Cabe resaltar que la adquisición de módulos de entrenamiento basados en equipos de medición y control representan un alto costo de inversión, y es por esto que en ocasiones se opta por otros mecanismos y metodologías para poder generar este tipo de competencias en los alumnos. Esto conlleva en un largo plazo, a generar un cierto grado de desinterés institucional

debido a la poca viabilidad que presenta la adquisición de este tipo de equipos, o en el mejor de los casos, terminar adquiriendo instrumentos menos funcionales y precisos por precios igual de elevados.

La finalidad de este trabajo es diseñar y construir un sistema de medición de propiedades eléctricas en materiales óhmicos, que sirva como modulo didáctico para la realización de prácticas en laboratorio de los cursos básicos de ingeniería que lo requieran en Unicatólica. Lo anterior mediante el uso de software y hardware libre de bajo costo como Arduino, que permitan incentivar el interés de los estudiantes por este tipo de tecnologías, al tiempo que facilita el desarrollo de nuevas aplicaciones industriales, mediante el uso de los conocimientos adquiridos en las materias impartidas. Hay que mencionar además que, al fabricar el sistema mediante la plataforma de arquitectura abierta, es mucho más fácil tratar temas de reparaciones y mantenimientos, además de que es muy factible alcanzar mediciones con un buen grado de precisión, comparadas con equipos usados en los laboratorios de docencia universitaria.

### 1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo diseñar y construir un sistema de medición de propiedades eléctricas en materiales óhmicos, utilizando plataformas de bajo costo, software y hardware libre como Arduino, y que pueda ser usado como herramientas de apoyo a los cursos básicos de ingeniería en Unicatólica?

### 1.2 SISTEMATIZACIÓN

¿Qué aspectos relevantes se deben tener en cuenta para construir un sistema de medición de propiedades eléctricas en materiales óhmicos?

¿Cómo se puede construir un sistema de medición de propiedades eléctricas en materiales óhmicos?

¿Qué factibilidad funcional y financiera debe tener el sistema de medición de propiedades eléctricas en materiales óhmicos, con el fin de ser atractivo ante la comunidad educativa?

## 2. JUSTIFICACIÓN

### 2.1 ALCANCE

Según (López Rúa & Tamayo Alzate, 2012), la actividad experimental es considerada como uno de los aspectos clave en el proceso de enseñanza y aprendizaje de las ciencias. Este tipo de metodología ratifica los fundamentos teóricos ya adquiridos, además de que fortalece aquellos objetivos relacionados con el conocimiento conceptual y procedimental. También, realiza un énfasis en el refinamiento de habilidades científicas como el pensamiento crítico, objetivo y creativo.

Dicho lo anterior, se realizó el diseño y construcción de un sistema de medición de propiedades eléctricas en materiales óhmicos, mediante el uso de plataformas de bajo costo, consideradas de arquitectura libre como lo es Arduino, que permita aterrizar estos conocimientos fundamentales adquiridos por los estudiantes de la Fundación Universitaria Católica Lumen Gentium, en asignaturas impartidas en los semestres iniciales tales como matemática, química y física. De igual forma, este documento presenta una validación técnica y económica del sistema que garantiza su uso pedagógico para que, de esta manera, sea una herramienta clara de ayuda en asignaturas avanzadas de profundización en el área ingenieril.

El presente trabajo incluye también el diseño electrónico de la fuente de corriente constante utilizada y los planos para la construcción de la cámara de muestras en acero inoxidable. Por otra parte, no son incluidos los planos y diseños correspondientes a los módulos electrónicos utilizados y se hace énfasis en que lo anterior no es producto de una implementación.

## 2.2 LIMITACIONES

Una de las limitaciones que se evidenciaron durante este proceso corresponde a los costos que implica un proyecto de este tipo dada la situación económica de la universidad a causa de la pandemia del Covid-19. Esto implica directamente en que la adquisición de equipos especializados resulte en una alta inversión. De igual manera, la cantidad de equipos requeridos también resulta ser una limitante para garantizar el aprendizaje en todos los estudiantes de las carreras ingenieriles.

Otra limitación que se pudo identificar en este proceso fue el reducido acceso a literatura especializada, que aborde temas como la implementación de prácticas de laboratorio para la medición de magnitudes como la resistividad de los materiales. También se puede incluir en este aspecto, el limitado acceso a literatura que aborde temas sobre la construcción desde cero de resistencias caloríficas con materiales específicos. Por esta razón, estos experimentos necesitan de laboratorios y equipamiento especializado para su realización, lo que los hace de muy difícil acceso por su alto costo de inversión.

## 2.3 IMPACTO SOCIAL

La fundación Universitaria Católica Lumen Gentium se ha caracterizado por ser una institución que cimienta el desarrollo personal, espiritual e intelectual de cada uno de sus estudiantes. Sus egresados se caracterizan por ser profesionales íntegros que quieren hacer uso de los conocimientos adquiridos para generar impacto en la sociedad. Con el diseño y construcción de este sistema de medición y su adhesión a las prácticas de laboratorio destinadas para los cursos básicos de ingeniería en Unicatólica, se busca potenciar ese pensamiento crítico y objetivo en los estudiantes de ingeniería industrial, orientándolos a cuestionar sus saberes y confrontarlos ante una realidad, así como a despertar y desarrollar esa curiosidad que desencadena en el conocimiento científico.

## 2.4 IMPACTO AMBIENTAL

Se construyó un horno en acero inoxidable cuyas dimensiones y geometría cilíndrica (13.875 cm diámetro de base, 11.465 cm diámetro de las paredes del horno y 16.005 de altura) son reducidas en comparación con hornos convencionales, los cuales son elaborados con otro tipo de materiales como ladrillos refractarios. Su funcionamiento se basa en el calentamiento de una resistencia tipo banda construida en el mismo material y es debido a esto que este sistema mantiene un consumo de energía menor al de los dispositivos especializados compuestos de resistencias fabricadas con elementos como el Kanthal, cuyo consumo es más elevado.

De igual forma, toda la estructura del horno fue construida con material reciclado y reutilizado, con el fin de mitigar un poco el impacto medioambiental que produce la fabricación desde cero de este tipo de piezas.

## 2.5 IMPACTO ECONÓMICO

Dentro de los impactos económicos que se pueden generar con una posible comercialización del sistema de medición de magnitudes eléctricas, se pueden considerar el hecho de que se estaría brindando a los colegios avalados para impartir básica secundaria, un producto tecnológico de buen desempeño, partiendo de una baja inversión. Del mismo modo, se estaría captando el interés de diferentes inversores como por ejemplo colegios privados y el gobierno nacional, para lograr que tanto instituciones educativas privadas como oficiales tengan acceso a este sistema de aprendizaje didáctico.

La comunidad estudiantil de la Fundación Universitaria Católica Lumen Gentium sería la principal beneficiada con la elaboración de este proyecto, primordialmente los estudiantes de las carreras de ingeniería. La institución se ve beneficiada en la

parte financiera debido a la disminución de los costos en la adquisición de equipamiento pedagógico.

Por último, se podría considerar como una oportunidad de negocio en donde se puedan generar ingresos y empleo formal en torno a una labor social importante como lo es impactar de manera positiva en la educación del país.

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1 GENERAL

Construir un sistema de medición de propiedades eléctricas en materiales óhmicos, utilizando plataformas de bajo costo, software y hardware libre (Arduino) como herramientas de apoyo a los cursos básicos de ingeniería en Unicatólica.

#### 3.2 ESPECÍFICOS

- Determinar los requisitos técnicos para la construcción de un sistema de medición de propiedades eléctricas en materiales óhmicos.
- Realizar el montaje del prototipo del sistema de medición de propiedades eléctricas.
- Evaluar la factibilidad del sistema desde un punto de vista técnico y el financiero.

#### 4. ESTADO DEL ARTE

Es ampliamente reconocido el hecho de que las prácticas experimentales resultan ser esenciales para la comprensión de conceptos e ideas que son tema de estudio de los estudiantes de ciencias e ingenierías. Como lo indica (Dominguez, y otros), cuando un estudiante demuestra una ley física o reconstruye un fenómeno físico en el laboratorio, se facilita su comprensión de estos de una manera más estable, duradera y funcional que cuando estos conceptos son solamente explicados de forma teórica en clase. Es por esto que las prácticas de laboratorio enfocadas a ciencias e ingenierías, cada día tienden a innovarse con el fin de abarcar nuevas tecnologías y así, demostrar conceptos teóricos y/o fenómenos físicos de una manera mucho más eficiente.

Tomando como referencia el trabajo llamado **“Mejorando una práctica del laboratorio docente de física mediante el uso de Arduino y de sensores de bajo coste.”** de los autores (Dominguez, y otros), quienes relatan que la implementación de plataformas de código abierto como Arduino en las prácticas de laboratorio de física, resultan ser muy beneficiosas ya que estas brindan oportunidades a los estudiantes de que exploren procesos asistidos por computador, aprendan técnicas básicas de programación científica, además de que incrementan la capacidad de fenómenos físicos que pueden ser estudiados dentro de un laboratorio de física dotado con estas facilidades.

Para esto, el autor propone un método de medición a partir de un sistema específico, un plano con inclinación variable. Con este montaje se pueden identificar las fuerzas que actúan sobre un objeto en modo estático, así como realizar estudios de movimiento de este mismo objeto sobre dicho plano inclinado. Con todo lo anteriormente dicho, los autores concluyen en que, mediante el uso de software y hardware abierto, basado en el uso de sistemas embebidos como Arduino y

sensores de bajo coste, se puede abrir un abanico de posibilidades en torno a posibles experimentos y prácticas de laboratorio aplicables.

De igual forma, en la publicación titulada “**Diseño de un sistema de medida de la temperatura, humedad e intensidad luminosa basado en el uso del microcontrolador Arduino**” de los autores (Gonzalez Flores & Sanchez Marquez, 2017), se resalta el hecho de que el diseño de sistemas de medición mediante el uso de la plataforma Arduino es de bajo coste en comparación con las soluciones comerciales actualmente, lo cual resulta bastante beneficioso tanto para las instituciones académicas como para los estudiantes que hacen uso de ellos.

En este trabajo se destaca el diseño y manufactura de un sistema de mediciones de magnitudes físicas tales como temperatura, humedad e intensidad luminosa, el cual permite captar información del ambiente mediante el uso de sensores de bajo coste sin que esto comprometa la calidad y precisión de las mediciones realizadas.

Hay que mencionar además que el control de los diferentes sistemas resulta ser una parte primordial en el área de la ingeniería. Lo anterior debido a que permite al ingeniero conocer dicho sistema y las consignas que hacen referencias a las entradas y salidas del mismo. También facilita el entender su funcionamiento por medio del constante monitoreo de variables específicas utilizando sensores especializados. Como se puede ver en el trabajo del autor (Saura Ródenas, 2020) el cual se titula “**Desarrollo de un entorno para la monitorización remota de prácticas de laboratorio para sensores de temperatura**”, se observa como los sistemas los sistemas Arduino son utilizados para prácticas de laboratorio en donde se realiza el monitoreo y control continuo de variables físicas como por ejemplo la temperatura. Con este tipo de plataformas se puede hacer uso de una gran variedad de sensores capaces de transformar en señal eléctrica las diferentes magnitudes físicas presentes como objeto de estudio. Todos estos datos obtenidos por medio

de los sensores que sean utilizados, pueden servir como parámetros para diferentes tipos de controladores, los cuales resulta otro campo muy utilizado en el desarrollo de la ingeniería industrial.

Por otra parte, si tomamos en consideración documentos como por ejemplo **“Control de posición de una bola mediante Arduino para el análisis de controladores PID”**, del autor (Sedano Jimenez, 2019), se pueden observar otro tipo de aplicaciones que puede llegar a tener una plataforma de software libre como lo es Arduino. En este caso, se hace uso de estos sistemas embebidos para la implementación de la teoría de control, más específicamente un control de tipo PID (Proporcional – Integral - Derivativo), con el fin de controlar un sistema inestable como lo es el sistema de barra y esfera. Con este modelo de aplicaciones se les permite a los estudiantes observar el funcionamiento de diferentes teorías y fenómenos físicos, con el objetivo de que comprendan de una manera visual y practica su comportamiento.

Igualmente, en el documento **“Sistema electrónico para control del climatizador de un vehículo”**, del autor (Gálvez Mora, 2020), se puede apreciar otro campo de aplicación de la teoría de control y los sistemas embebidos de software y hardware libre como Arduino. En este caso, nuevamente se aplica el controlador PID en un sistema de climatización de un vehículo automotor. Gracias a esto, podemos evidenciar la versatilidad de los sistemas embebidos y como estas diferentes implementaciones tienen en común la manipulación de variables y magnitudes físicas como por ejemplo la temperatura, mediante el uso de la teoría de control.

De igual forma, los microcontroladores Arduino resultan ser una poderosa herramienta de prototipado que permite su implementación en cualquier rama de la ingeniería en la que se desee representar un sistema de cualquier índole. Gracias a su arquitectura compuesta de entradas analógicas y digitales, podemos realizar

la adquisición de datos mediante el uso de sensores que permitan captar las magnitudes que son el objeto de estudio. Ejemplo de esto es el trabajo **“Implementación de un horno automático de convección para el soldado de componentes electrónicos de montaje superficial”** del autor (Quimbita Mosquera, 2020), en donde se puede observar cómo los microcontroladores Arduino puede ser implementados en la industria de la electrónica, más específicamente en el proceso de soldadura mediante pistolas de calor o cautines. En este documento se puede analizar como un sistema embebido de arquitectura libre y de bajo coste como lo es Arduino puede llegar a obtener datos de temperatura por medios de sensores especializados, y ejecutar un código bajo su propio entorno de programación que le permite realizar una acción de control sobre el actuador de este caso (Pistola de calor o caufín), según las especificaciones dadas por el usuario que ejecuta su uso.

## 5. MARCO REFERENCIAL

### 5.1 MARCO TEÓRICO

#### 5.1.1 Ley de Ohm

La Ley de Ohm es una herramienta esencial para el estudio de la conducción de los materiales metálicos. Su descubrimiento se realizó a principios del siglo XIX a manos del científico alemán Georg Simon Ohm y, según palabras de (Bauer & Westfall, 2011), la Ley de Ohm establece que la caída de potencial a través de un dispositivo es igual a la corriente que fluye a través del mismo, multiplicada por la resistencia del material.

$$V = I \cdot R \quad (1)$$

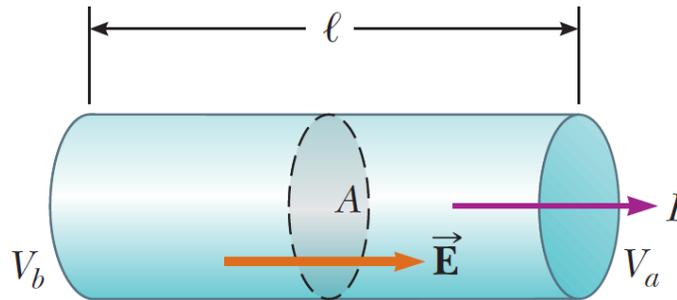
Básicamente, esta ley explica de manera muy sencilla que la diferencia de potencial (V), que se aplica entre los extremos de un conductor predefinido, es directamente proporcional a la intensidad de la corriente (I) que circula por el mismo, según la resistencia del material (R), el cual es el factor de proporcionalidad que mantiene esta relación existente. Los materiales que obedecen la ley de Ohm son comúnmente los metales y/o conductores, los cuales se denominan óhmicos. Se debe de tener en cuenta que esta no es una ley fundamental de la naturaleza, sino que más bien es una relación empírica que describe la conducción en materiales estos materiales específicos (Serway & Jewett, 2005).

Dicho lo anterior, todo material tiene una característica intrínseca que depende de las propiedades del mismo y de su temperatura; por lo cual se puede afirmar que la resistencia de un material depende de su geometría y de su resistividad. La ecuación 2 define lo anteriormente dicho, donde  $\rho$  es la resistividad, L la longitud y

A el área transversal del material en cuestión. La Figura 1 muestra un esquema del modelo de conducción en materiales óhmicos.

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2)$$

Figura 1. Conductor uniforme de longitud " $\ell$ " y un área de sección transversal " $A$ ". La diferencia de potencia  $\Delta V = V_b - V_a$  que se mantiene de un extremo al otro del conductor establece un campo eléctrico " $\vec{E}$ ", y este campo produce una corriente " $I$ " que es proporcional a la diferencia de potencial.



Fuente: (Serway & Jewett, 2005).

Por otra parte, la resistividad es una propiedad que varía en función de la temperatura. Este cambio está dado según un factor denominado coeficiente de temperatura  $\alpha$ , el cual es característico para cada material. Lo anterior se describe en (3) en donde  $\rho$  es el nuevo valor de resistividad del material,  $\rho_0$  es el valor de resistividad inicial,  $\alpha$  es el coeficiente de temperatura,  $T$  y  $T_0$  hacen referencia a la temperatura final e inicial respectivamente del material objeto de estudio.

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (3)$$

### 5.1.2 Transferencia de calor

La transferencia de calor es el proceso de propagación del mismo en los distintos medios disponibles. Esta se produce siempre que existan dos sistemas en contacto y con diferentes temperaturas. Una de las características más importantes de este proceso es que los sistemas participantes tienden a alcanzar un equilibrio térmico (igualan sus temperaturas), además de que este no puede ser detenido, únicamente hacerse más lento.

El calor puede transferirse de tres diferentes formas que serán explicadas a continuación. De igual forma, cabe resaltar que para que se efectúen cualquiera de estos modos de transferencia, debe existir una diferencia de temperatura en donde la energía siempre fluirá desde el cuerpo de mayor temperatura hacia el de menor temperatura.

**Transferencia por conducción:** Este modo consiste en la transferencia de calor entre dos cuerpos sin que esto produzca transferencia de materia entre los mismos. Como lo explican (Moran & Shapiro, 2006), la conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de sus interacciones.

La conducción puede presentarse en sólidos, líquidos o gases. La transferencia de calor en los sólidos se debe a la combinación de las vibraciones de las moléculas del material y al transporte de energía por medio de los electrones libres. Por otra parte, en los líquidos y gases, esta conducción es dada por las colisiones y la difusión de las moléculas durante su movimiento.

El análisis de la situación que permite entender de una mejor manera este proceso radica en el proceso de enfriamiento de una bebida enlatada en un cuarto caliente.

Esta se calienta hasta conseguir el equilibrio térmico por medio de la transferencia de calor por conducción del cuarto hacia la bebida, por intermedio de aluminio.

La transferencia de calor por conducción está dada por la Ley de Fourier, la cual nos dice que la razón de la conducción de calor a través de una capa plana es proporcional a la diferencia de temperatura ( $T_2 - T_1$ ) a través de esta y al área ( $A$ ) de transferencia de calor, pero es inversamente proporcional al espesor de esa capa ( $\Delta x$ ). En donde  $k$  es la constante de conductividad térmica del material en estudio (Kreith, Manglik, & Bohn, 2012).

$$Q_{\text{cond}} = -kA \frac{T_2 - T_1}{\Delta x} \quad (4)$$

**Transferencia por convección:** Partiendo de la definición dada por (Çengel & Boles, 2012), quienes nos indican que la convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacente que está en movimiento. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección. Existe la convección forzada en el cual, el fluido es forzado a fluir sobre la superficie mediante medios externos al sistema como, por ejemplo, un ventilador, una bomba o el mismo viento.

Por otra parte, en la convección natural el movimiento del fluido es causado por las fuerzas de empuje que son inducidas por las diferencias de densidad debidas a la variación de la temperatura en ese fluido. La rapidez con que se produce la transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura como lo indica la Ley de Newton del enfriamiento.

$$Q_{\text{conv}} = hA_s(T_s - T_f) \quad (5)$$

En donde  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección del material en estudio y  $A_s$ , es el área superficial sobre la cual tiene lugar la transferencia de calor. El parámetro  $T_s$  hace referencia a la temperatura de la superficie y  $T_f$  es la temperatura del fluido lejos de la superficie.

**Transferencia por radiación:** Según (Çengel & Boles, 2012), en los estudios de transferencia de calor, el interés se halla en la radiación térmica, que es la forma de radiación que emiten los cuerpos debido a su temperatura. De igual forma se afirma que todos los cuerpos a una temperatura superior al cero absoluto emiten radiación térmica. El ejemplo por excelencia de este tipo de transferencia de calor consiste en el modo en como la energía del sol llega a la tierra.

La radiación que se puede emitir desde una superficie real está determinada por la Ley de Stefan-Boltzmann.

$$Q_{\text{emitida}} = \epsilon \sigma A T_s^4 \quad (6)$$

En donde  $\epsilon$  es la emisividad de la superficie y  $\sigma$  hace referencia a la constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$ ).

### 5.1.3 Control PID

Para comprender de una mejor manera la función principal y lo que es en sí un controlador PID, se debe indagar en un primer lugar sobre lo que resulta ser un sistema de control y los principales tipos de sistemas que existen en la industria. Un sistema de control es un grupo de elementos y dispositivos que se interrelacionan con el objetivo de regular o dirigir el comportamiento de un sistema y así, reducir en gran medida posibles fallas y errores provocados generalmente por perturbaciones externas. Existen muchos ejemplos en nuestra vida diaria sobre sistemas de control,

por ejemplo, el piloto automático de muchos sistemas de transporte, el cual relaciona un parámetro de referencia deseado por el operario y este se encarga de corregir el rumbo del vehículo a pesar de las perturbaciones externas que este pueda llegar a sufrir (ráfagas de viento, fuertes olas, obstáculos en la vía, etc.)

Los sistemas de control se pueden clasificar en dos tipos, sistemas de control de lazo abierto y sistemas de control de lazo cerrado. Como lo define (Hernández Gaviño, 2010), los sistemas de control de lazo abierto son aquellos en el cual la acción de control es, en cierto modo, independiente de la salida del sistema. Es decir que un control de lazo abierto es aquel que, mediante una señal de referencia genera una acción de control sobre el sistema susceptible para alcanzar un valor establecido en la salida, pero con el añadido de que este no concibe una retroalimentación o *feedback* para lograr que sea autónomo. Este tipo de sistemas de control habitualmente se encuentran regulados por la variable tiempo que determina su periodo de funcionamiento hasta llegar al valor deseado en la salida del mismo y como algunos ejemplos de este tipo podemos encontrar los hornos tostadores, hornos microondas, las lavadoras, etc.

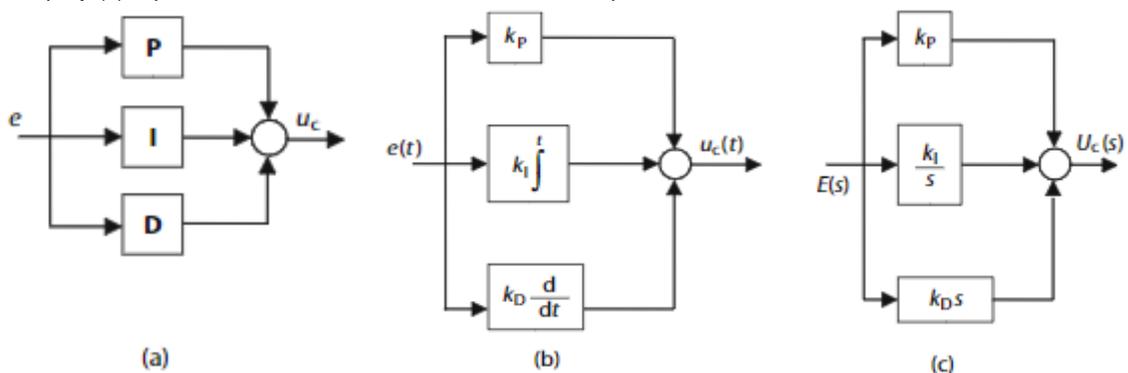
De igual manera, (Hernández Gaviño, 2010) indica que los sistemas de control de lazo cerrado son aquellos en los cuales la acción de control depende de la salida. Estos utilizan sensores para detectar los valores que se producen en la salida (comportamiento actual), para posteriormente compararlos con la señal de referencia de la entrada (comportamiento deseado), a este proceso se le denomina retroalimentación. Ejemplos de sistemas de lazo cerrado pueden ser refrigeradores, calentadores de agua, control de temperatura en una habitación mediante un sensor termostato, hornos industriales, etc.

En base a lo anterior, a continuación se presenta el concepto de control PID. Como lo describen (Moreno Améstegui, 2001), el controlador PID, el cual hace referencia

a la acción de control **Proporcional, Integral y Derivativa**, es un controlador retroalimentado (lazo cerrado) cuyo propósito es hacer que el error en estado estacionario, entre la señal de referencia y la salida de la planta, sea cero de manera asintótica en el tiempo.

La **acción proporcional** es la encargada de minimizar el error del sistema. En su interior, esta acción de control multiplica una constante de sintonía proporcional por la señal del error generada. Tiene beneficios como aumentar la velocidad de respuesta del sistema y disminuir el error hasta una nueva interrupción, pero también tiene efectos negativos como lo es el aumentar la inestabilidad del sistema. Por su parte, la **acción integral** es aquella que se encarga de ir sumando pequeños errores a lo largo del tiempo, con el fin de disminuir aún más el error y de estabilizar el sistema en su estado estacionario, mediante una constante de sintonía integral. Por último, se encuentra la **acción derivativa**, que es la encargada, en cierta forma, de “predecir el futuro” mediante la derivada de la señal del error. Este proceso de predicción de la salida del error es llevado a cabo mediante la extrapolación del error de control en la dirección de la tangente a su curva respectiva (Moreno Améstegui, 2001). En la Figura 2 se puede observar la representación simbólica de un controlador PID (a), su modo de operación en el dominio del tiempo (b) y su forma continua después del cálculo de su transformada de Laplace (c).

Figura 2. (a) Representación simbólica de un controlador PID, (b) representación simbólica en el dominio del tiempo y (c) representación simbólica en el dominio de Laplace.

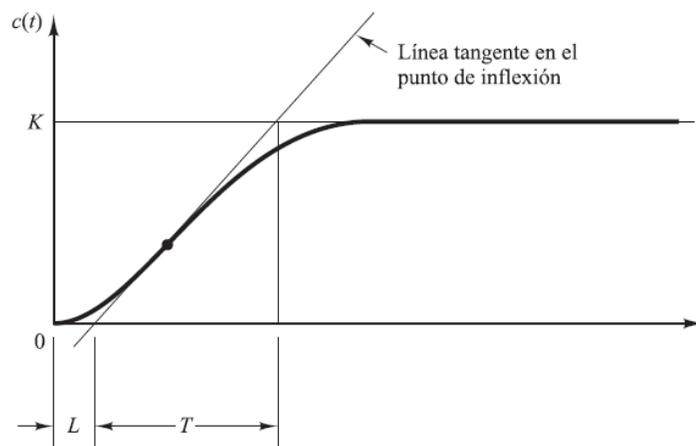


Fuente: (Johnson & Moradi, 2005).

#### 5.1.4 Sintonización de controladores PID por el método de Ziegler y Nichols

La sintonía en los controladores PID se usa con el fin de determinar aquellos parámetros con el cual el controlador cumple las especificaciones de transitorio y de estado estacionario en un sistema de lazo cerrado. Uno de los métodos de sintonía más utilizados es el propuesto por Ziegler y Nichols, ya que este define unas reglas para determinar los valores de  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$  que darán una operación estable al sistema, con base en la respuesta experimental de este frente a una señal de escalón unitario. Si el comportamiento de la planta no contiene integradores ni polos opuestos complejos conjugados, la curva de respuesta generalmente adopta la forma de una "S" la cual se caracteriza por dos parámetros principales: el tiempo de retardo ( $L$ ) que hace referencia al tiempo que demora el sistema en comenzar a responder ante el estímulo; y la constante de tiempo ( $T$ ), la cual define el tiempo de estabilización del sistema. Ambos valores son obtenidos de manera experimental trazando una recta tangente al punto de inflexión de la curva y determinando sus intersecciones con el eje del tiempo y con la línea constante que genera el escalón unitario, tal y como se puede observar en la Figura 3. Una vez obtenidos estos valores de tiempo, se procede a aplicar las formulas preestablecidas para el cálculo de las constantes que se muestran en la tabla 1 (Ogata, 2010).

Figura 3. Curva de respuesta del sistema frente a un escalón unitario.



Fuente: (Ogata, 2010).

Tabla 1. Regla de sintonía de Ziegler y Nichols basada en la respuesta escalón del sistema.

TIPO DE CONTROLADOR	Kp	Ti	Td
P	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
PI	$0.9\frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2\frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Fuente: (Ogata, 2010).

Cabe aclarar que esta regla de sintonía de Ziegler y Nichols supone una estimación inicial razonable de los parámetros del controlador, por lo cual proporcionan un punto de partida para una posterior ajuste fino hasta obtener el resultado deseado. Este ajuste de sintonía se realiza de la siguiente manera (ver tabla 2) (Ogata, 2010).

Tabla 2. Regla de sintonía manual para controladores PID.

<b>ACCIÓN PROPORCIONAL (Kp)</b>	Se aumenta poco a poco la acción proporcional para disminuir el error, lo cual aumentar la velocidad de respuesta del controlador.
	Si el sistema se vuelve inestable antes de conseguir la respuesta deseada, se debe aumentar la acción derivativa.
	Si se alcanza la respuesta deseada en velocidad y error, el PID ya se encuentra sintonizado.
<b>ACCIÓN DERIVATIVA (Kd)</b>	Si el sistema es demasiado inestable, se aumentará poco a poco la constante derivativa Kd para conseguir de nuevo estabilidad en la respuesta.

<b>ACCIÓN INTEGRAL (Ki)</b>	En el caso de que el error del sistema sea mayor que el deseado, se aumentará la constante integral Ki hasta que el error se minimice con la rapidez deseada.
	Si el sistema se vuelve inestable antes de conseguir la respuesta deseada, se debe aumentar la acción derivativa.

Fuente: (Ogata, 2010).

### 5.1.5 Ingeniería económica

La ingeniería económica es una especialidad que integra los conocimientos de ingeniería con los elementos básicos de la microeconomía. Su objetivo fundamental es la valoración sistemática de las posibles alternativas tecnológicas de inversión, mediante la utilización de herramientas de cálculo, las cuales permiten la toma de decisiones basada en dichas comparaciones económicas. Para el desarrollo de este trabajo, la toma de decisiones sobre la viabilidad económica del proyecto se llevó a cabo haciendo uso de las herramientas VPN y TIR, las cuales se describen a continuación (Zagarramurdi, Parín, & Lupin, 1998).

**Valor presente neto (VPN):** Para (Urbe, 2022), es el valor monetario que resulta de restar la suma de los flujos descontados a la inversión inicial. Aplicando el principio del valor actual a los flujos incrementales que en distintos períodos genera un proyecto se obtiene este indicador a través de la siguiente expresión:

$$VPN = FC_0 + FCN_{1,1N} - A_0 \quad (7)$$

Donde:

FC<sub>0</sub>: Flujo de caja o inversión del año de presupuesto.

FCN: Flujo de caja o inversión del año N.

N: Número de periodos en años.

$A_0$ : Año de presupuesto

Al realizar los cálculos correspondientes del VAN se obtienen las siguientes alternativas:

$VPN > 0$  (Proyecto rentable)

$VPN = 0$  (Proyecto es indiferente)

$VPN < 0$  (Proyecto no rentable)

De lo anterior, se puede deducir que un proyecto es económicamente conveniente cuando el VPN es mayor a cero, puesto que la rentabilidad que genera es mayor al costo de oportunidad del capital (Urbe, 2022).

Para (Najul, 2006) existen 3 razones que hacen válida la aplicación de este método. La primera es que respeta los principios de las finanzas ya que permite calcular el valor de un activo, operación o negocio, de acuerdo con la riqueza que genere, no importando el escenario planteado, la capacidad o tamaño del negocio, ni la magnitud del riesgo asociado a la inversión. La segunda razón es que se adapta a cualquier circunstancia debido a que no encuentra problemas para evaluar cualquier tipo de proyecto o actividad, ya que su esquema de cálculo depende de la simple actualización de los flujos de caja para el momento inicial establecido. Por último, el autor resalta que este método exige realizar una evaluación cabal de los proyectos, lo cual resulta ser uno de sus principales atributos.

**Tasa interna de retorno (TIR):** La Tasa Interna de Retorno es el porcentaje de beneficio o pérdida que puede conllevar cualquier inversión económica, en otras palabras, hace referencia a la tasa de rentabilidad que puede llegar a ofrecer un proyecto de inversión. Es una herramienta bastante utilizada debido a que permite conocer esta rentabilidad relativa expresada a través de un sencillo porcentaje, además de que guarda relación con el VPN, ya que está definida como la tasa de descuento necesaria para que el VPN adquiera un valor igual a cero en un proyecto de inversión determinado (Software del Sol, 2022).

La tasa interna de retorno se calcula de la siguiente manera:

$$TIR = \sum_{T=0}^n \frac{F_n}{(1+i)^n} = 0 \quad (8)$$

En donde:

$F_n$ : Flujos de caja en cada periodo T

i: Valor de la inversión inicial

n: Numero de periodos

Para analizar la viabilidad de un proyecto de inversión, la TIR obtenida debe ser comparada con una tasa que representa el costo de oportunidad de una inversión. De esta manera se facilita su comprensión al tratarse de dos porcentajes que se comparan entre sí, es decir, el mayor representa entonces una mayor rentabilidad (Torres, 2022).

## 5.2 MARCO CONCEPTUAL

### 5.2.1 Memoria ROM

Las memorias ROM (o Read Only Memory por sus siglas) son un tipo de memorias presentes en la mayoría de las computadoras. La principal característica de estas es que no son volátiles, es decir, que la información guardada sigue estando almacenada, aun después de que se apague el dispositivo. Del mismo modo, son dispositivos con una capacidad de almacenamiento inferior al de otros tipos de memorias que existen, como por ejemplo las memorias RAM, Flash, etc (Alonso, 2022).

### 5.2.2 Sistemas embebidos

Los sistemas embebidos es una combinación de hardware y software creado para realizar una o algunas funciones dedicadas. En este tipo de sistemas, la mayoría de los componentes se encuentran incluidos e integrados en una misma placa base y, es por esto que son generalmente usados para satisfacer necesidades específicas (Román Bueno & González Mantilla).

Los sistemas embebidos se encuentran presentes en la cotidianidad de las personas. Ejemplos de estos se pueden encontrar en electrodomésticos de uso común como los hornos microondas, los teléfonos, sistemas de sonido, etc. Estos sistemas suelen tener un chip de características especiales que se encarga del control de todas las funciones principales llamado microcontrolador, y que es conocido como el cerebro del sistema (Román Bueno & González Mantilla).

### 5.2.3 Software y hardware libre

El software libre es aquel que respeta la libertad de los usuarios y la comunidad en general. A grandes rasgos, significa que los usuarios tienen la libertad para ejecutar,

copiar, distribuir, estudiar, modificar y mejorar el software. Es decir que radica más en una cuestión de libertad, no de precio. Por su parte, el hardware libre es aquel cuyas especificaciones, diagramas esquemáticos, diseños y/o planos son de acceso público, ya sea bajo algún tipo de pago o de forma gratuita (Gnu, 2020).

#### 5.2.4 Arduino

El sistema Arduino es una placa electrónica desarrollada bajo el concepto de software y hardware libre. Esta incorpora un microcontrolador re-programable así como un conjunto de pines que permiten la conexión de este con diferentes tipos de sensores y actuadores de una manera muy intuitiva. (Arduino, 2022). Arduino ha traído consigo una revolución de la cultura digital en el mundo moderno, puesto que ha generado gran impacto en áreas como la educación, la programación, la innovación y el emprendimiento. Hoy en día se pueden encontrar comunidades enteras de profesionales y entusiastas de la robótica y la electrónica, en un constante intercambio de conocimiento sobre aplicaciones y proyectos implementados con este sistema (Carrillo, 2022).

Las principales ventajas que se obtienen al trabajar con los sistemas Arduino son su bajo coste, ya que se pueden encontrar placas de prototipado Arduino en el mercado desde aproximadamente \$ 38.000 pesos colombianos. Del mismo modo, otra de las ventajas radica en que existe una gran familia de placas con ciertas similitudes y características propias, adaptables al proyecto que se quiera llevar a cabo. Debido a que Arduino funciona con software y hardware libre, hay muchas posibilidades de rediseñar circuitos y de ampliar las aplicaciones de esta herramienta. Igualmente, su sencilla interfaz de programación y el lenguaje con base en C++, lo hacen una herramienta versátil y de fácil implementación con la que se pueden realizar interesantes proyectos de electrónica y robótica (Savasgard, 2014).

### 5.2.5 Sensor

La definición de un sensor, en la mayoría de los casos, tiende a variar según el área de aplicación. En el campo de la electrónica se puede afirmar que un sensor es un dispositivo que permite captar magnitudes físicas y transformarlas en una señal eléctrica. Un concepto más general sería, como lo sugieren (Corona Ramírez, Abarca Jiménez, & Mares Carreño, 2014), un sensor se define como un dispositivo de entrada que provee una salida manipulable de la variable física medida. La característica más importante a tener en cuenta de los sensores es que estos solo pueden funcionar como un dispositivo de entrada, es decir, que los sensores actúan como un intermediario entre la variable física que se quiere medir, y el sistema de medición, y únicamente proporcionan datos útiles para este último (Corona Ramírez, Abarca Jiménez, & Mares Carreño, 2014).

Los sensores se pueden clasificar de muchas maneras; la más común de ellas es según el tipo de variable física que son capaces de detectar. Dentro de las más conocidas se encuentran los sensores de posición, velocidad y aceleración, nivel, proximidad, humedad y temperatura, fuerza, flujo, presión, color, luz, visión, de gas y pH, biométricos y de corriente, entre otros. Para la elaboración de este proyecto se hizo uso de sensores de temperatura y de corriente respectivamente. Los sensores de temperatura son componentes electrónicos que relacionan la variación de energía térmica de un objeto, con una variación equivalente de una señal eléctrica. Ejemplos de estos encontramos los termistores, la termocupla, sensores de temperatura resistivos y los circuitos integrados. Para este caso, se optó por trabajar con la termocupla el cual es uno de los dispositivos más usados en la industria. Su funcionamiento se basa en un par de conductores generalmente metálicos y de diferentes propiedades, unidos entre sí. Las principales ventajas de la termocupla son su bajo costo, amplio rango de temperaturas y su fácil implementación. Por el contrario, como desventajas se encuentran que su la salida

no es lineal y usualmente necesita una etapa de amplificación (Corona Ramírez, Abarca Jiménez, & Mares Carreño, 2014).

#### 5.2.6 Arduino IDE

Un entorno de desarrollo integrado, también llamado IDE (en inglés, *integrated development environment*), es un programa informático compuesto por un conjunto de herramientas de programación. Puede dedicarse en exclusiva a un solo lenguaje de programación o bien puede utilizarse para varios más. Es un entorno de programación que ha sido empaquetado como un programa de aplicación; es decir, que consiste en un editor de código, un compilador, un depurador y un constructor de interfaz gráfica (GUI). Además, en el caso de Arduino incorpora las herramientas para cargar el programa una vez compilado, en la memoria flash del hardware (Aprendiendoarduino, 2020).

#### 5.2.7 Resolución

La resolución es la mínima variación de la magnitud medida que da lugar a una variación perceptible de la indicación del correspondiente valor. Dicho de otra forma, la resolución nos indica el valor mínimo a partir del cual se puede notar una variación o salto en la medida de aquello que se está midiendo (Raig, 2020).

#### 5.2.8 Horno

Los hornos son dispositivos capaces de generar calor y de mantenerlo dentro de un volumen específico, determinado por la geometría y dimensiones del mismo. Gracias a estas características, son comúnmente utilizados en sectores como la gastronomía, para la cocción de alimentos, así como en las diferentes industrias como por ejemplo fundición de minerales, pinturas especializadas, etc. Los hornos son clasificados principalmente según la fuente energética que utilicen. Esta puede

ser la combustión como por ejemplo los hornos a gas, leña, derivados del petróleo, etc; también pueden ser de radiación como por ejemplo los hornos microondas; y eléctricos como es el caso de los hornos resistivos. Otra forma de clasificar los tipos de horno es de acuerdo a su modo de funcionamiento o según el proceso en el cual sean requeridos. Dentro de estas categorías encontramos los hornos de convección, de templado de vidrio, de difusión, de galvanización, de recocido, etc. Según la clasificación, estos resultan ser hornos elaborados con unas especificaciones en concreto que garantizan el desempeño en dichos procesos (Kanthal, 2022).

Con relación a los hornos eléctricos, estos a su vez se clasifican en hornos eléctricos de arco, de inducción y resistivos. Los hornos eléctricos de arco están compuestos generalmente por un revestimiento de material refractario y electrodos de grafito o carbón amorfo. Son usados en procesos de baño de sales, y en la fusión de diferentes tipos de metales (Carbosystem, 2022). En los hornos de inducción, por su parte, el calor es generado por la inducción eléctrica producto de un campo magnético en un medio conductor. Son generalmente usados en fundición de metales y en la realización de tratamientos térmicos (Indutecsa, 2022).

#### 5.2.9 Fuente de alimentación

Las fuentes de alimentación se han convertido en una parte esencial en los proyectos de electrónica que surgen diariamente. Su principal función es la de convertir la tensión alterna de entrada de la red, en tensión continua para alimentar los diferentes circuitos. Debido a esto, son generalmente conocidas como el corazón del sistema ya a que son estas las en cargadas de suministrar la potencia requerida y, del mismo modo, ejercen protección contra posibles variaciones de carga y tensión que puedan afectar negativamente al sistema (Suárez, 2004). Las fuentes de alimentación son comúnmente clasificadas en dos grupos dependiendo de su estructura. Por un lado se encuentran las **fuentes de alimentación lineales**, las

cuales permiten controlar la tensión de salida ajustando continuamente la caída de tensión en un transistor de potencia, por lo cual operan con una corriente continua donde el nivel de tensión en la entrada debe ser superior al generado a la salida del mismo. Las principales ventajas que tienen este tipo de fuentes radican en la simplicidad de su diseño debido a los pocos componentes que utilizan y en su costo. Por otra parte, este tipo de fuentes garantizan una eficiencia del 30% al 60%, lo que resulta ser una de sus principales desventajas junto con su peso y la disipación de calor del resto de la energía (Ramírez, 2019). Por otro lado se encuentran **las fuentes de alimentación conmutadas**. Su principio de funcionamiento se basa en el uso de un transistor en zona de corte y saturación, logrando obtener periodos de tiempo en donde la tensión y la corriente son nulos. Lo anterior se obtiene mediante el uso del concepto básico de las fuentes conmutadas, el cual es convertir la tensión de entrada de la red, en una señal cuadrada. Las principales ventajas de este tipo de fuentes son la eficiencia (que puede llegar hasta 93% o más) y su reducción considerable en su peso. Del mismo modo, con este tipo de fuentes se pueden establecer diferentes configuraciones capaces de garantizar mayor o menor tensión a la salida o varias salidas de diferentes valores de tensión que incluso puede llegar a ser inversos (negativos) (Ramírez, 2019).

Las fuentes de alimentación también se catalogan de acuerdo al tipo de suministro que entregan. Hay fuentes cuya función principal es la de otorgar diferentes valores de voltaje o tensión, así como otras se especializan en entregar valores de corriente variables o constantes. En la realización de este proyecto se hizo uso de una fuente de corriente constante cuyo principal objetivo es el de proporcionar un valor de corriente estable, independientemente de la carga resistiva que le sea conectada, variando el voltaje o la tensión que recae sobre esta (Harrison, 2005).

#### 5.2.10 Resistencia Shunt

Una resistencia shunt es una carga resistiva a través de la cual se deriva una corriente eléctrica. En la mayoría de las veces, este valor de resistencia es conocido con precisión y es utilizado para determinar la intensidad de corriente eléctrica que fluye a través de esta carga, mediante la medición de la diferencia de tensión o voltaje a través de ella, y valiéndose de la ley de Ohm para ello (Construmatica, 2020).

#### 5.2.11 Analito

Es un término comúnmente utilizado para hacer referencia a una sustancia, material u objeto que posee un interés real en nuestra muestra, debido a que resulta ser la parte que se desea analizar, conocer o cuantificar (Méndez, 2020).

#### 5.2.12 Resistividad

La resistividad hace referencia a la propiedad intrínseca que tienen los materiales de oponerse al paso de la corriente eléctrica. Es designada por la letra griega rho ( $\rho$ ) y se mide en ohmios por metro ( $\Omega \cdot m$ ). La resistividad describe el comportamiento eléctrico de un material, dando un acercamiento o idea de lo buen o mal conductor que es. Cuanto mayor sea la resistividad, menor es la tendencia del elemento a dejar pasar electrones, en otras palabras, peor conductor es (Bauer & Westfall, 2011).

#### 5.2.13 PWM (*Pulse Width Modulation*)

PWM o modulación por ancho de pulso, es una técnica que se usa para transmitir señales analógicas cuya señal portadora es digital. En esta técnica se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica (señal senoidal, cuadrada, etc.), ya sea para

transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga. Básicamente, consiste en activar una salida digital durante un tiempo y mantenerla apagada durante el resto, generando así pulsos positivos que se repiten de manera constante. De esta manera, la frecuencia es constante (es decir, el tiempo entre disparo de pulsos), mientras que se hace variar la anchura del pulso (Solectroshop, 2020).

#### 5.2.14 Control por ángulo de fase

El control de ángulo de fase es un método que se aplica en la electrónica de potencia para controlar la potencia de los dispositivos que trabajan con la alimentación AC (Corriente Alterna). Este tipo de control requiere de un elemento semiconductor esencial llamado TRIAC (Triodo para Corriente Alterna), el cual se compone de dos tiristores conectados en paralelo y en sentido opuesto. Tiene la cualidad de que comparten una única compuerta mediante la cual se genera una señal de disparo que hace que el TRIAC se active volviéndose conductivos en términos de corriente en ese momento. Si se controla el tiempo en que un TRIAC está en conducción, se puede regular la potencia que le es entregada a una carga resistiva (por ejemplo, una bombilla AC), en donde se cumple que entre más largo sea el retraso establecido, menor será la potencia emitida (Rashid, 1993).

#### 5.2.15 ISO 9001:2015

La norma ISO 9001 de 2015 es un conjunto de normas internacionales que establecen las guías y requisitos para la administración y el aseguramiento de la calidad. Esta norma se basa principalmente en los principios de la gestión de la calidad que se describen en la ISO 9000, los cuales son el enfoque al cliente, liderazgo, compromiso de las personas, el enfoque hacia los procesos, la mejora continua, la toma de decisiones basada en evidencia y la gestión de las relaciones. El principal objetivo de la norma ISO 9001 es el de promover un enfoque orientado

hacia los procesos, mediante el desarrollo, implementación y mejora constante de un sistema de gestión de la calidad, en donde por calidad, la norma define el grado en el que un conjunto de características inherentes de un objeto, producto o servicio cumple con los requisitos establecidos (ISO, 2015). La adopción de un sistema de gestión de la calidad representa beneficios potenciales para las empresas tales como la capacidad de proporcionar regularmente productos y servicios que satisfagan los requisitos del cliente, garantizar la mejora continua y abordar los riesgos y oportunidades asociados al contexto de la empresa, mediante un enfoque de pensamiento basado en riesgos (ISO, 2015).

La norma ISO 9001 de 2015 cuenta con 10 capítulos en su estructura basada en el ciclo PHVA de la mejora continua. Para el desarrollo de este trabajo se hizo énfasis en el capítulo número 7: Apoyo, más específicamente el inciso 7.1.5.2 que habla sobre la trazabilidad de las mediciones. En el transcurso de este inciso, la norma hace referencia a que las empresas o compañías deben de realizar la identificación de los equipos de medición que participan de manera activa durante la elaboración de los productos o servicios que se ofrecen. Del mismo modo, estas deben de llevar a cabo una serie de requisitos cuando la trazabilidad de las mediciones resulta ser una parte esencial para generar confiabilidad en los productos o servicios brindados por la empresa. Estos requisitos hacen referencia a que los equipos de medición utilizados deben calibrarse, verificarse o ambas, en intervalos específicos o antes de su utilización, con base en patrones de mediciones trazables o de medición internacional. Cuando no existan tales patrones, se debe conservar toda la información documentada del proceso de calibración o verificación utilizado. Por otra parte, los instrumentos de medición deben ser identificables para determinar su estado, así como protegerse contra daños, deterioro o ajustes que puedan comprometer su estado de instrumento calibrado o verificado (ISO, 2015).

### 5.3 MARCO CONTEXTUAL

El desarrollo de este proyecto se llevó a cabo con el fin de beneficiar a la comunidad universitaria, más específicamente de los programas de ingeniería que se brindan en la Fundación Universitaria Católica Lumen Gentium, en la sede que se ubica en el barrio Meléndez de la ciudad de Santiago de Cali. Su enfoque está direccionado hacia el laboratorio de Física y Química con el que cuenta esta sede de la universidad.

Unicatólica está interesada en que la comunidad estudiantil se vea involucrada con proyectos de índole social y por lo cual, permite plantear iniciativas apoyados en su infraestructura y en la capacidad investigativa de los profesores y estudiantes que hacen parte del grupo de investigación INGENIO EXACTO de la facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería.

### 5.4 MARCO LEGAL

#### 5.4.1 Ley 30 de 1992

La Ley 30 de 1992 es la encargada de la regulación de las universidades y brindar el enfoque hacia el cual debe de apuntar la educación superior. Esta ley establece las normas generales que permite regular el sistema educativo general colombiano, el cual debe cumplir una función social afín a las necesidades e interés de la sociedad en general. El objetivo de la Ley 30 es el de velar por la consecución de la apertura económica, guiando a que las universidades aporten al desarrollo de nuevas tecnologías y a la explotación de aquellas emergentes, de tal manera de que, independientemente del sector privado u oficial, se pueda competir de manera más óptima en el mercado global (Congreso de la República, 29 de diciembre de 1992).

El capítulo 6, artículos 28 y 29, lo cuales hablan sobre la autonomía de las instituciones de educación superior, recalcan que la ley reconoce a las universidades el derecho a darse y modificar sus estatutos, designar sus autoridades académicas y administrativas, crear, organizar y desarrollar sus programas académicos, definir y organizar sus labores formativas, académicas, docentes, científicas y culturales, otorgar los títulos correspondientes, seleccionar a sus profesores, admitir a sus alumnos y adoptar sus correspondientes regímenes y establecer, arbitrar y aplicar sus recursos para el cumplimiento de su misión social y de su función institucional. En otras palabras, permite que las universidades puedan designar sus propias autoridades académicas, creen y desarrollen sus propios programas académicos con la inclusión de nuevas tecnologías, así como el definir y organizar las labores académicas y demás (Congreso de la República, 29 de diciembre de 1992).

#### 5.4.2 Ley 115 de 1994

La ley 115 de 1994, en su artículo 32 establece que la educación media técnica y la educación superior estará dirigida a la formación calificada en especialidades tales como: agropecuaria, comercio, finanzas, administración, ecología, medio ambiente, industria, informática, minería, salud, recreación, turismo, deporte y las demás que requiera el sector productivo y de servicios. Estas deben incorporar, en su formación teórica y práctica, lo más avanzado de la ciencia y de la técnica, para que el estudiante esté en capacidad de adaptarse a las nuevas tecnologías y al avance de la ciencia (Congreso de la República., 8 de febrero de 1994).

## 6. METODOLOGÍA

### 6.1 TIPO DE ESTUDIO

El tipo de estudio y la investigación realizada en este trabajo de grado fue de carácter exploratoria, debido a que se estableció una problemática con el fin de orientar la revisión de la literatura en una mayor profundización, hacia la temática del uso de Arduino como un sistema de medición (Vásquez Hidalgo, 2022)

De igual forma, también se llevó a cabo una investigación de tipo documental, debido a que toda la información que permitió la construcción del prototipo, fue extraída de artículos científicos, publicaciones en revistas, libros especializados y medios electrónicos. Lo anterior sirvió para la estructuración de un estado del arte sólido que soporta esta investigación (Vásquez Hidalgo, 2022).

### 6.2 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

Se realizó una investigación de tipo cuantitativa, cuyo enfoque está orientado a la recolección e interpretación de datos numéricos mediante el uso de software especializado como por ejemplo OriginPro. Lo anterior permitió brindar un soporte sobre la factibilidad de una posible implementación del sistema de medición en los cursos de ciencias básica e ingeniería de Unicatólica (Rus Arias, 2022).

### 6.3 FUENTES Y TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN

Para el desarrollo de este documento, se hizo uso de fuentes primarias de información como por ejemplo libros especializados sobre temas de física, termodinámica, electrónica y sistemas embebidos. De esta literatura se obtuvo información sobre toda la teoría aplicada a los sistemas de medición de magnitudes eléctricas. Del mismo modo, se recurrió a trabajos de grado, artículos y publicaciones en revistas científicas los cuales brindaron un punto de partida para el desarrollo de este proyecto.

Igualmente, dentro de estas mismas fuentes de información se utilizaron entrevistas con personal docente capacitado en las áreas de interés como, por ejemplo, física, termodinámica, economía e ingeniería. El saber y la experiencia recopilada de estas entrevistas sirvieron para dar dirección a la investigación realizada y expresar de una manera más eficaz los resultados obtenidos.

## 7. DESARROLLO PRIMER OBJETIVO

### 7.1 REQUISITOS DE LA FUENTE DE CORRIENTE CONSTANTE

Se realizó el levantamiento de los requerimientos necesarios para la construcción de la fuente de corriente constante, necesaria para realizar las mediciones de resistividad establecidas. Esta información se recopiló tomando como referencia las investigaciones realizadas y mencionadas en el estado del arte de este documento. Dicha información se muestra en la tabla que se presenta a continuación (ver tabla 3).

Tabla 3. Requerimientos técnicos para la fuente de corriente constante.

<b>TAMAÑO</b>	Compacto
<b>COSTO</b>	Construcción con materiales de bajo coste
<b>RANGO DE VOLTAJE DE CONTROL (VOLTAJE PWM)</b>	0V – 5V
<b>CORRIENTE MÁXIMA</b>	200 mA
<b>CORRIENTE MÍNIMA</b>	20 mA

Fuente: elaboración propia.

### 7.2 REQUISITOS PARA EL HORNO RESISTIVO

Para efectuar esta actividad, y siguiendo la misma metodología utilizada en la actividad anterior, se organizó en una tabla aquellas especificaciones que debía cumplir la cámara de muestras que contiene a la resistencia y el analito, tal y como se presenta a continuación (ver tabla 4).

Tabla 4. Especificaciones y requerimientos para la cámara de muestras (horno).

<b>SEGURIDAD</b>	Se debe evitar que las paredes externas produzcan lesiones tales como quemaduras.
<b>MANIPULACIÓN</b>	Se debe considerar un espacio razonablemente cómodo para la manipulación de la resistencia, el soporte para muestras y demás elementos.
<b>DISEÑO</b>	Construcción robusta en materiales resistentes para evitar posibles deformaciones. Se debe considerar el soporte para la resistencia calorífica.
<b>TRANSPORTE</b>	Debe ser de fácil transporte. Se debe garantizar un peso no mayor a 5 Kg.

Fuente: elaboración propia.

### 7.3 REQUISITOS PARA LA ELECTRÓNICA DE POTENCIA DEL PROTOTIPO

Del mismo modo, para el desarrollo de esta actividad, se tomaron en consideración las características de funcionamiento del sistema a construir, con base en las especificaciones de la resistencia utilizada. Lo anterior se puede observar en la siguiente tabla (ver tabla 5).

Tabla 5. Especificaciones y requerimientos para la electrónica de potencia necesaria.

<b>ALIMENTACIÓN</b>	110VAC – 120VAC
<b>POTENCIA MÁXIMA DEL CIRCUITO</b>	1.760 W
<b>TIPO DE CONTROL</b>	Control por fase digital
<b>COMPATIBLE CON ARDUINO</b>	Si
<b>TAMAÑO</b>	Tamaño y espacio reducido
<b>COSTO</b>	Construcción con materiales de bajo coste

Fuente: elaboración propia.

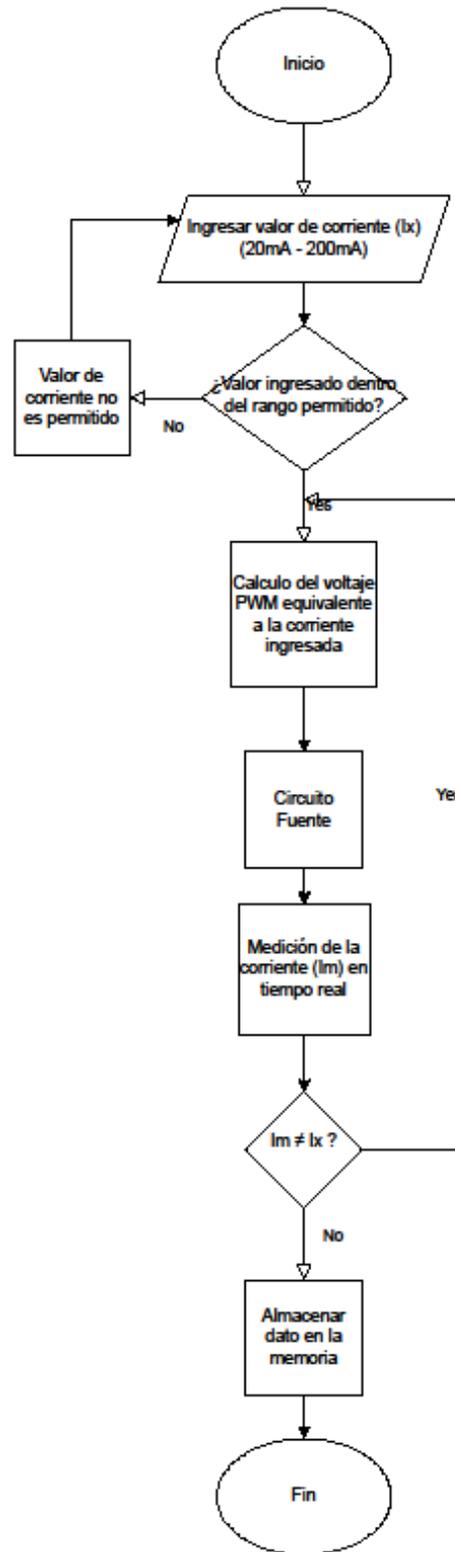
## 7.4 REQUISITOS PARA EL DISEÑO DE SOFTWARE

El levantamiento de los requerimientos de la programación necesaria se realizó mediante diagramas de flujo, los cuales denotan el orden lógico del algoritmo funcional a construir. A continuación, se muestra cada uno de los diagrama de flujo diseñados para cada funcionamiento principal del sistema de medición.

### 7.4.1 Diagrama de flujo para funcionamiento de la fuente de corriente constante

En la Figura 4, se muestra el diagrama de flujo correspondiente al funcionamiento de la fuente de corriente constante. En este programa, el usuario ingresa el valor de corriente ( $I_x$ ) que desea, el cual debe estar en el rango de 20mA a 200mA, y posteriormente se hace la validación de que el valor ingresado se encuentre dentro del rango permitido. En caso tal de que este por fuera, el programa emite una alerta visual en donde se especifica que se debe ingresar un nuevo valor. Por el contrario, si el valor ingresado es un dato dentro del rango permitido, el programa calcula el voltaje PWM que corresponde al valor de corriente ingresado, el cual es enviado al circuito fuente. Paralelamente, debe realizar la medición de esta corriente ( $I_m$ ) en tiempo real, con el fin comparar ambos valores y realizar un ajuste si es necesario. Posteriormente a esto, se debe realizar la captura de datos en la memoria.

Figura 4. Flujograma del funcionamiento de la fuente de corriente constante.

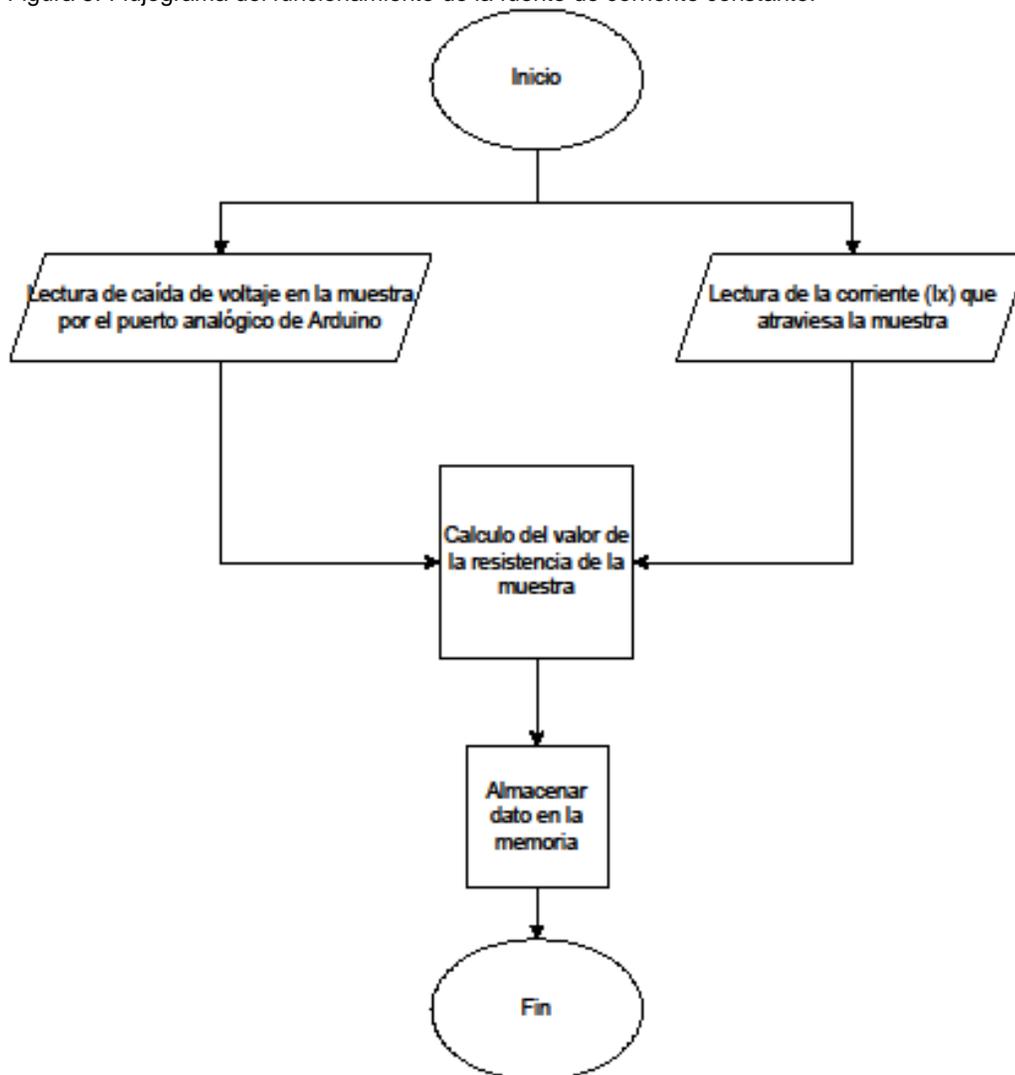


Fuente: elaboración propia.

#### 7.4.2 Diagrama de flujo para la medición de la resistencia de la muestra

En la Figura 5 se muestra otra sección de la programación, en donde se realiza la lectura de la caída de voltaje existente en la muestra, por medio de los puertos analógicos de Arduino y, de igual forma, se mide la corriente que atraviesa la muestra ( $I_x$ ) en ese instante de tiempo. El programa realiza el cálculo del valor de resistencia de la muestra con los datos anteriormente medidos y su resultado es almacenado en la memoria.

Figura 5. Flujograma del funcionamiento de la fuente de corriente constante.

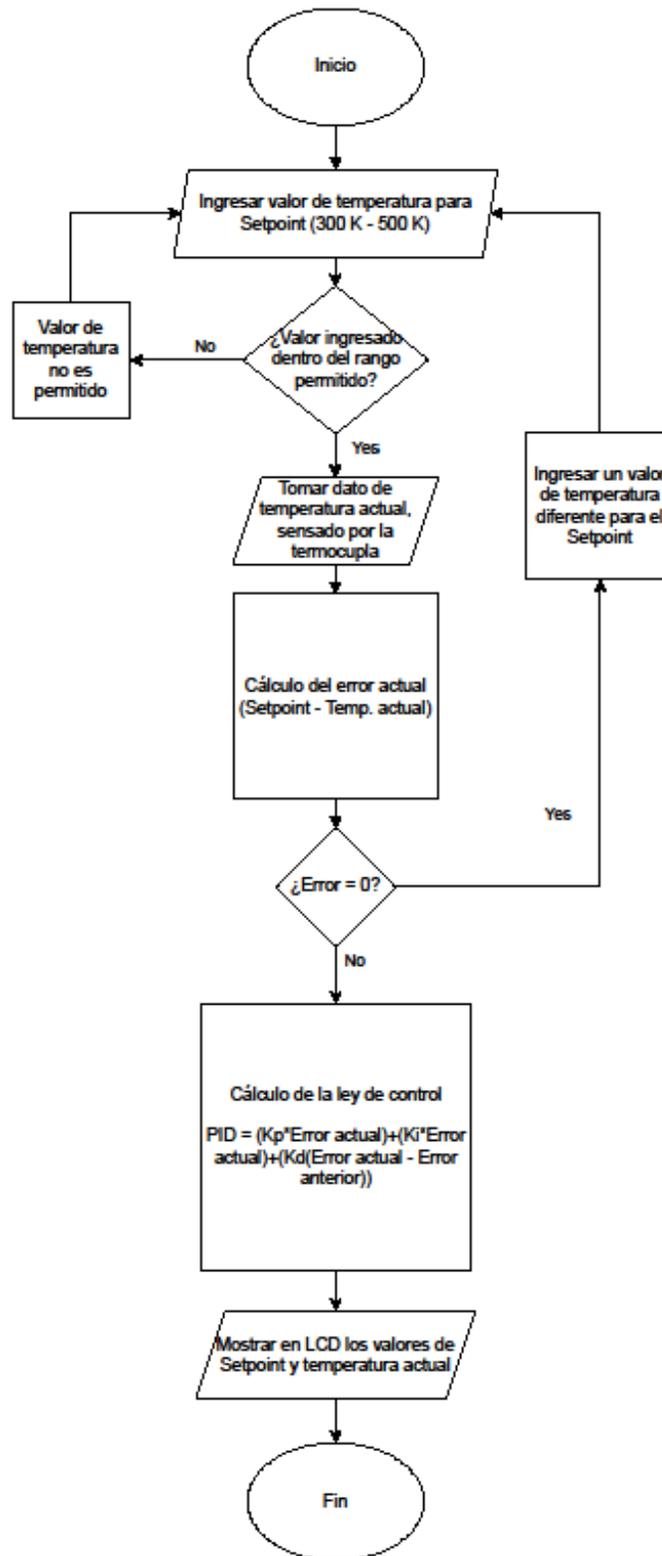


Fuente: elaboración propia.

### 7.4.3 Diagrama de flujo para el funcionamiento del controlador PID

En la Figura 6, se muestra el diagrama de flujo que explica el funcionamiento del controlador PID del sistema de medición construido. Al inicio, la programación solicita que el usuario ingrese un valor de temperatura dentro del rango estipulado de 300 K a 500 K, para definir el *Setpoint* del sistema. Se hace la validación de que el valor ingresado si se encuentre dentro del rango y si este no es válido, el sistema enviara una alerta visual que le indica al usuario que se digitó un valor que no es permitido. Si por el contrario, se trata de un valor permitido, el sistema comienza a medir la temperatura actual por medio del sensor (termocupla) y, paso siguiente, calcula el error actual necesario para efectuar la ley de control. Simultaneo a esto, por medio de una pantalla LCD que tiene el dispositivo, se está visualizando el valor de *Setpoint* digitado y la temperatura que sensa la termocupla. El dato que arroja el cálculo de la ley de control, alimenta el código correspondiente al control de fase que efectúa el módulo BT 319 800E.

Figura 6. Flujograma del funcionamiento del controlador PID del sistema.



Fuente: elaboración propia.

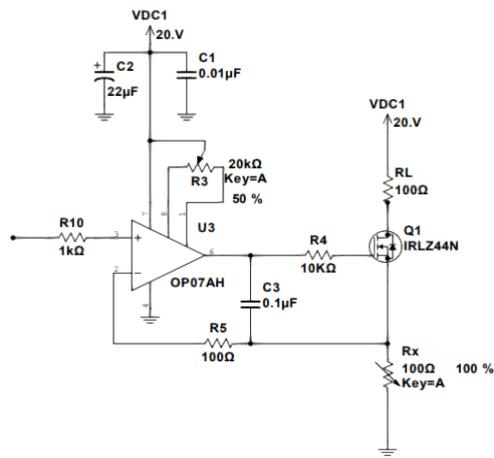
## 8. DESARROLLO SEGUNDO OBJETIVO

### 8.1 CONSTRUCCIÓN DE LA FUENTE DE CORRIENTE CONSTANTE

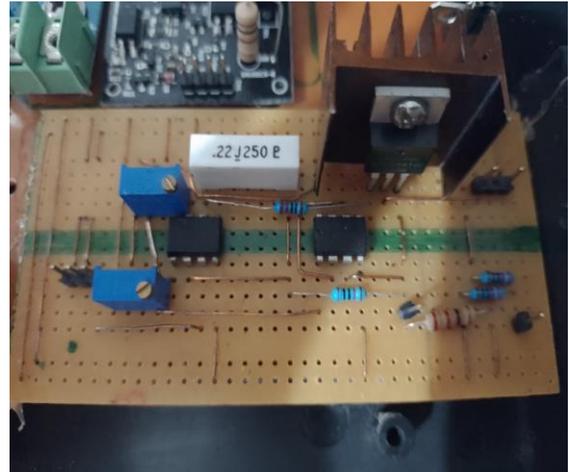
Para realizar las mediciones de resistividad en el prototipo, se planteó el diseño de una fuente de corriente con la cual se puede garantizar una corriente constante sobre la muestra. El diseño planteado hace uso de un transistor tipo MOSFET (Transistor de Efecto de Campo Metal-Óxido-Semiconductor) el cual permite el paso de corriente entre sus pines fuente (*Source*) y drenado (*Drain*), por intermedio de un voltaje en la compuerta (*Gate*) del transistor. Este diseño se realizó con base a la literatura existente y haciendo uso de componentes electrónicos de bajo coste (Harrison, 2005).

El montaje experimental se realizó haciendo uso de una PCB universal, sobre la cual se soldaron los componentes electrónicos que se presentan en la Figura 7. En la Figura 7a, se muestra el diagrama de conexión utilizado para la construcción de la fuente de corriente constante y en la Figura 7b se presenta una fotografía del montaje realizado para el prototipo. De igual forma, en la Figura 8 se presenta el diseño para una PCB comercial realizado por el equipo de trabajo en el software libre EasyEDAstd.

Figura 7. (a) Diagrama del circuito de la fuente de corriente constante y (b) montaje prototipo de la fuente de corriente constante.



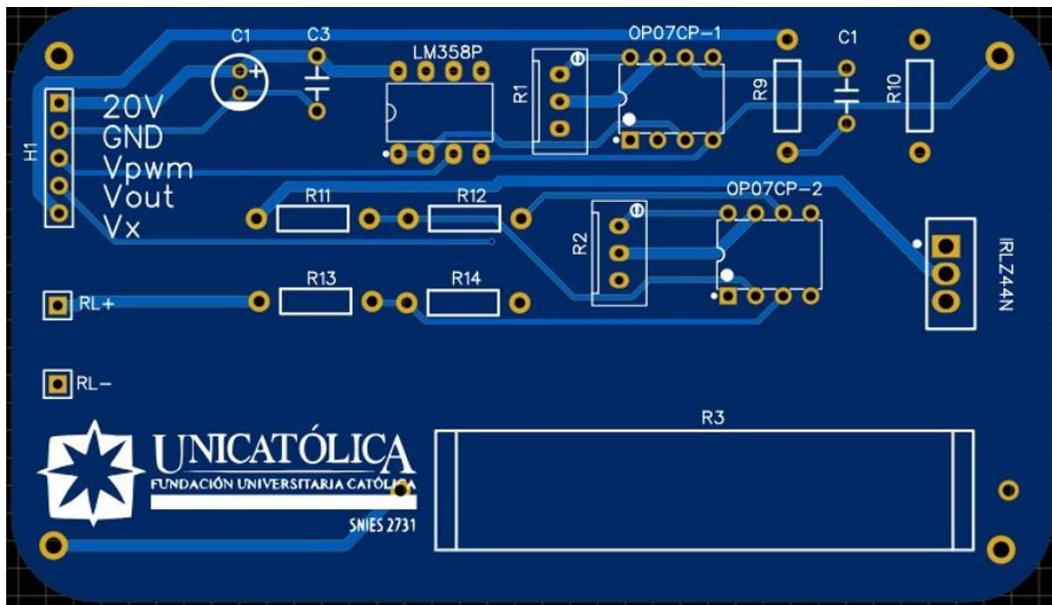
(a)



(b)

Fuente: elaboración propia.

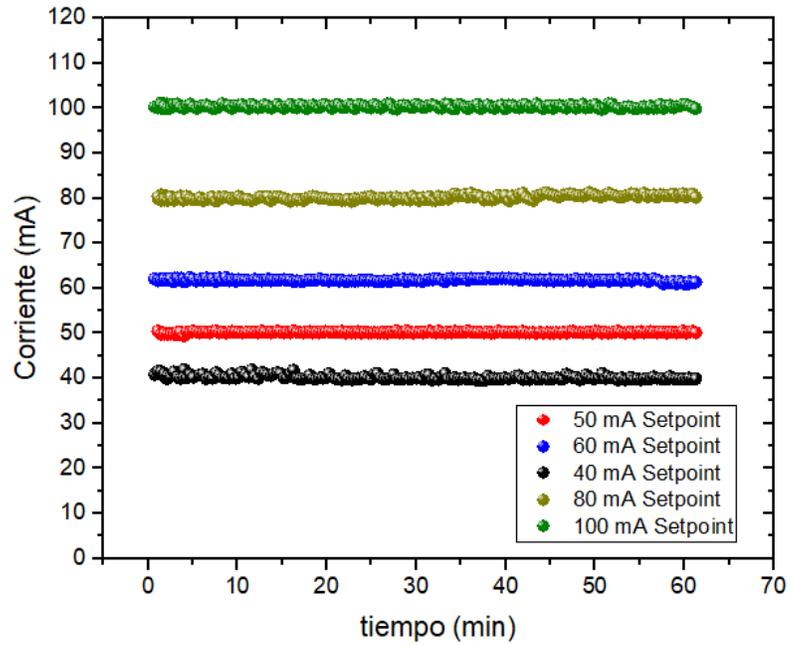
Figura 8. Diseño de PCB comercial para el sistema de mediciones.



Fuente: elaboración propia mediante software libre EasyEDAstd.

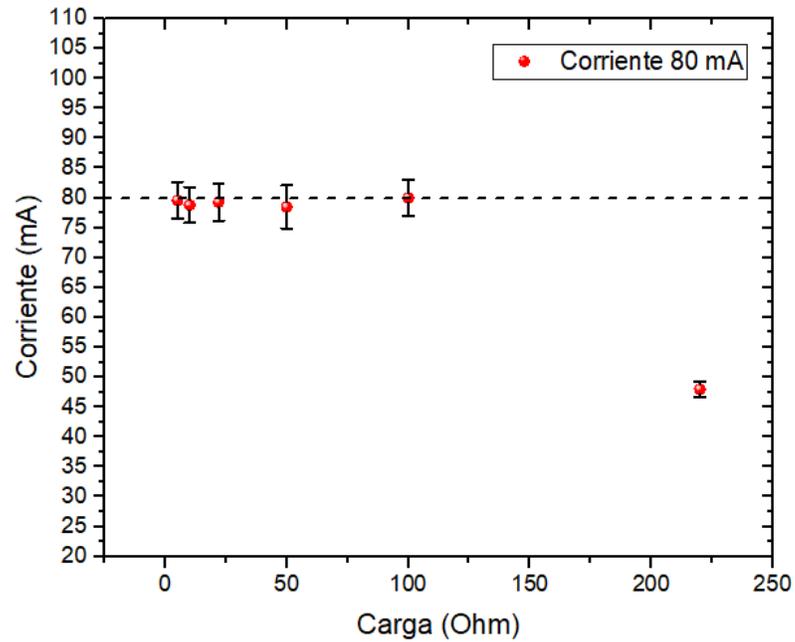
Para comprobar que la fuente de corriente constante construida cumpla su objetivo, se realizaron pruebas de estabilidad con diferentes valores de corriente tomados como referencia. En la Figura 9 se puede observar que esta fuente mantiene constante el valor de corriente ingresado para un tiempo estimado de operación de una hora. Del mismo modo, se realizaron las pruebas necesarias para garantizar la estabilidad de carga soportada por la fuente. Para esto, se determinó un valor constante de corriente como *Setpoint* de 80 mA y se procedió a variar la carga sobre la cual debe pasar este valor de corriente. Los resultados de estas pruebas se pueden observar en la Figura 10 en donde se comprueba que la fuente diseñada es capaz de garantizar un valor constante de corriente hasta un valor de resistencia de 100  $\Omega$ , sin que la corriente varíe más de un 5% con relación al valor de referencia deseado.

Figura 9. Grafica de estabilidad para un tiempo de funcionamiento de 1 hora.



Fuente: elaboración propia.

Figura 10. Grafica de estabilidad para diferentes valores de carga resistiva



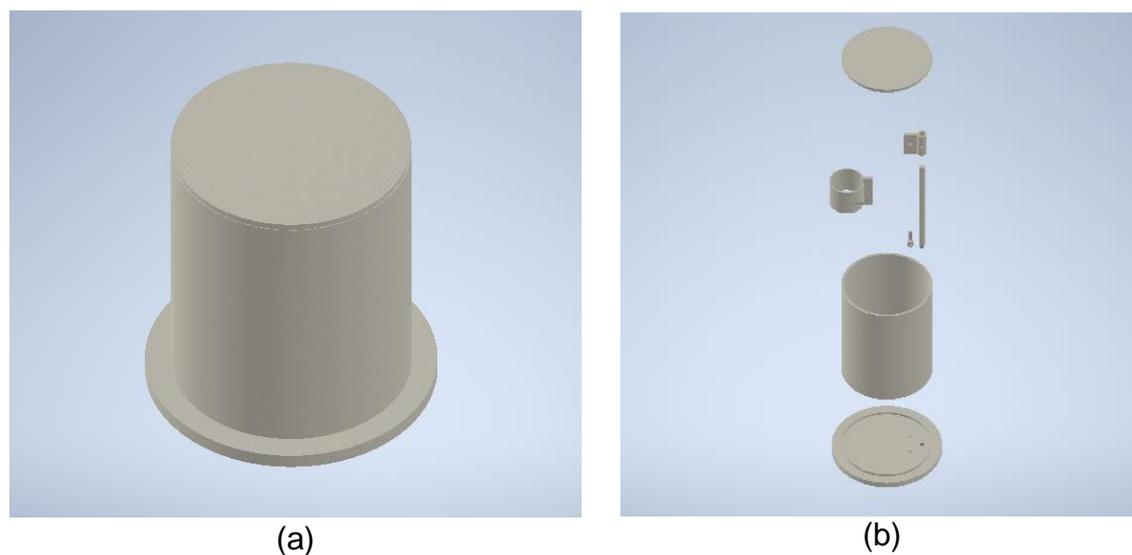
Fuente: elaboración propia.

## 8.2 FABRICACIÓN DE LA CÁMARA DE MUESTRAS

Una vez establecido lo anterior, se fabricó una cámara de muestras con geometría cilíndrica en acero inoxidable, compuesta por una base de diámetro más amplio que el cilindro para garantizar su estabilidad en superficies planas. Del mismo modo, cuenta con una tapa independiente para evitar al máximo la manipulación del resto de sus partes. Este diseño y el material de construcción garantizan solidez y resistencia ante golpes, prolongando considerablemente la vida útil del prototipo.

Por otra parte, en el diseño se fabricó un soporte en acero inoxidable el cual permite configurar la ubicación de la resistencia (altura con respecto a la base). Lo anterior sirve para garantizar un espacio considerable entre la resistencia y las paredes internas del horno, lo cual evita que estas se calienten y produzcan lesiones al usuario. De igual manera, esto genera comodidad al momento de colocar en el soporte las muestras a analizar. Cabe resaltar además que toda la estructura, incluyendo la resistencia, no excede los 5 kg de peso lo cual hace que sea un horno portable, fácil de manipular y de espacio reducido frente a otros modelos existentes. A continuación, en la Figura 11a se presenta el modelado 3D de la cámara de muestras construida y en la Figura 11b, la vista explosionada del prototipo y sus componentes. En la tabla 6 se observan las características geométricas del sistema y en los anexos del documento, se muestran las dimensiones finales del prototipo.

Figura 11. Modelado 3D correspondiente a la cámara de muestras. (a) Vista exterior y (b) Vista explosionada.



Fuente: elaboración propia mediante software CAD Inventor 2022, licencia estudiantil.

Tabla 6. Dimensiones geométricas de la cámara de muestras.

<b>ALTO</b>	16.40 cm $\pm$ 0.01 cm
<b>ANCHO</b>	13.875 cm $\pm$ 0.005 cm
<b>DIÁMETRO BASE</b>	13.875 cm $\pm$ 0.005 cm
<b>DIÁMETRO TAPA</b>	11.385 cm $\pm$ 0.005 cm

Fuente: elaboración propia.

Según los requerimientos planteados, se optó por la elección de una resistencia tipo banda. Este tipo de resistencias cuentan con una geométrica cilíndrica lo que permite concentrar el calor generado en un área requerida y, adicionalmente, resulta favorable su utilización dada la forma en la cual se construyó la cámara de muestras, con lo que se puede generar una mayor comodidad al momento de su manipulación y adecuación. A continuación se presenta la resistencia de tipo banda elegida (ver Figura 12).

Figura 12. Resistencia tipo banda utilizada para la construcción del prototipo, 126  $\Omega$ .

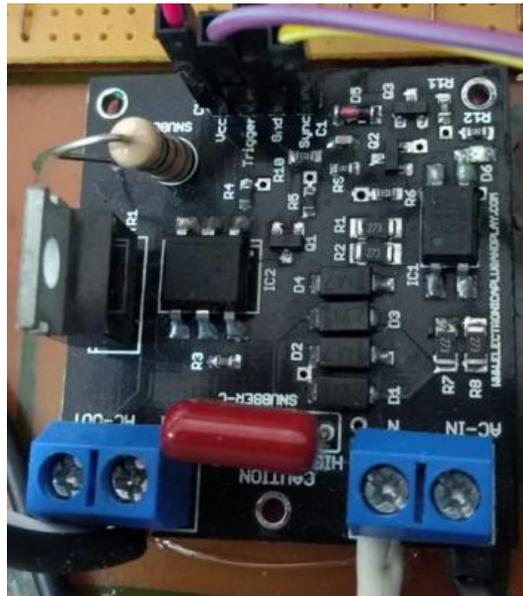


Fuente: elaboración propia.

### 8.3 SELECCIÓN DE LA ELECTRÓNICA DE POTENCIA Y EL CONTROL PID

Debido a que este sistema trabaja con el suministro de la red pública (AC) de la universidad, se optó por utilizar integrados de potencia de la familia TRIAC (*TRIode for Alternating Current*), más específicamente la referencia **BT 319 800E**. Este tipo de arreglo de diodos se caracterizan por permitir conmutar el paso de la corriente alterna, mediante el pin de disparo "*Trigger*", haciendo uso del control por ángulo de fase y la detección del cruce por cero que facilita un optocoplador; todo esto por intermedio del pin denominado "*Sync*" o de sincronización. En la Figura 13 se presenta el módulo comercial utilizado para efectuar el control por ángulo de fase digital.

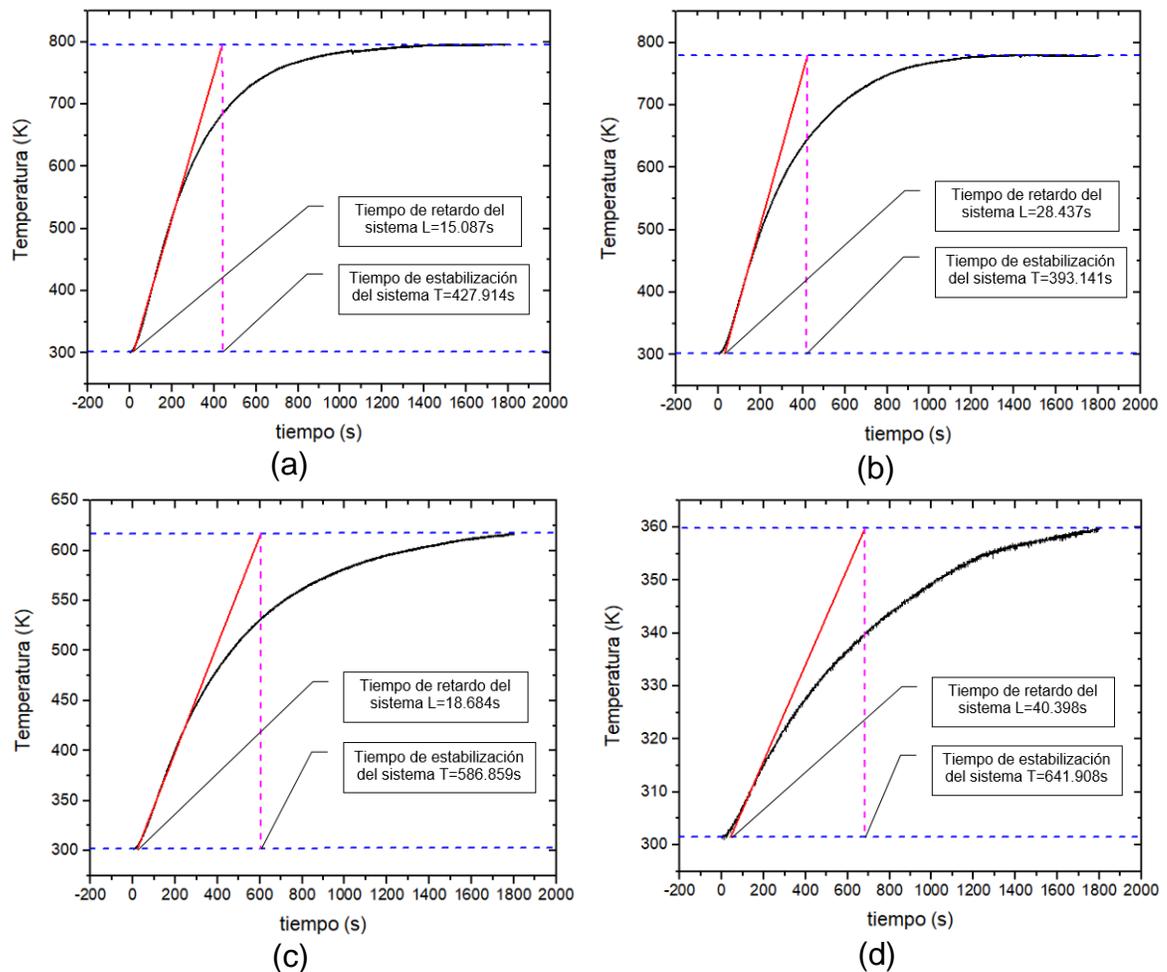
Figura 13. Módulo de potencia BT 319 800E compatible con Arduino.



Fuente: elaboración propia.

Para la implementación del control PID, primero se realizó la curva de caracterización para obtener las variables de sintonía necesarias para configurar este tipo de controladores. Se usó el prototipo de la cámara y el control de potencia de manera directa. Se definieron 4 valores constantes de retardo para el control por ángulo de fase que aplica potencia a la resistencia y se midió la temperatura, el tiempo de retardo en la respuesta y de estabilización del sistema. De esta manera, se obtuvieron cuatro diferentes curvas características de temperatura en función del tiempo cuyo comportamiento simula el de un sistema de primer orden, en el cual se presenta un tiempo de retardo en la respuesta, así como un tiempo de estabilización al alcanzar la temperatura deseada.

Figura 14. Curvas de caracterización del sistema para los valores de retardo para el control por ángulo de fase de (a) 1.043 ms, (b) 2.084 ms, (c) 4.167 ms y (d) 6.252 ms.



Fuente: elaboración propia.

Como se muestra en la figura 14, se obtuvieron los valores de tiempo de retardo (L) y de estabilización del sistema (T), necesarios para realizar los cálculos de las constantes de sintonía para cada una de las gráficas, según el método propuesto por Ziegler y Nichols. A partir de la Figura 14b se calcularon los valores de las constantes con el fin de aprovechar la rapidez evidenciada en el cambio de la temperatura. El valor de estas constantes de sintonía se muestran en la tabla 7. Con estos valores se procedió a realizar un ajuste fino de sintonía, según las indicaciones dadas en el inciso 5.1.4 (ver tabla 2). De lo anterior, se encontraron los

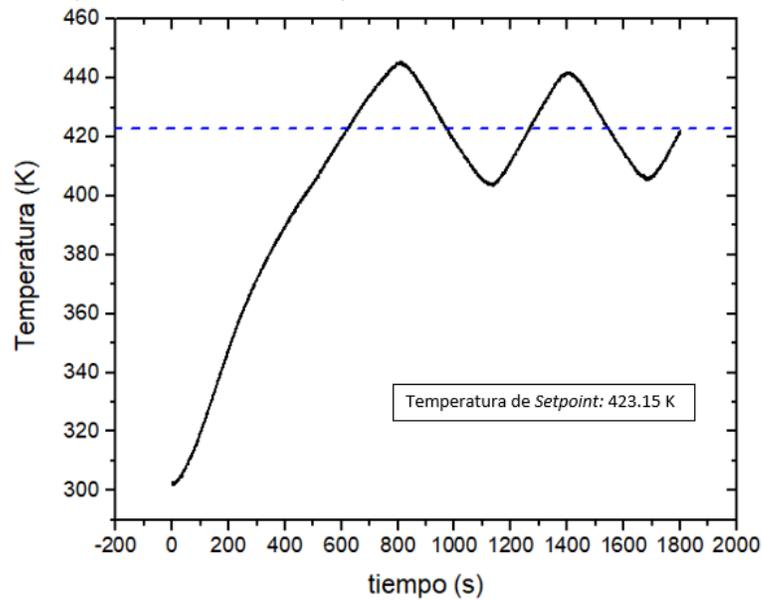
valores de sintonía para las constantes  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$ , los cuales se presentan a continuación en la tabla 8 y, de igual forma, en la Figura 15 se muestra el comportamiento que adopta el control PID con estos valores.

Tabla 7. Constantes de sintonía para el control PID (método de Ziegler - Nichols).

<b><math>K_p</math></b>	16.590
<b><math>K_i</math></b>	0.292
<b><math>K_d</math></b>	235.885

Fuente: elaboración propia.

Figura 15. Grafica de respuesta del control PID implementado.



Fuente: elaboración propia.

Tabla 8. Constantes de sintonía para el control PID (ajuste manual).

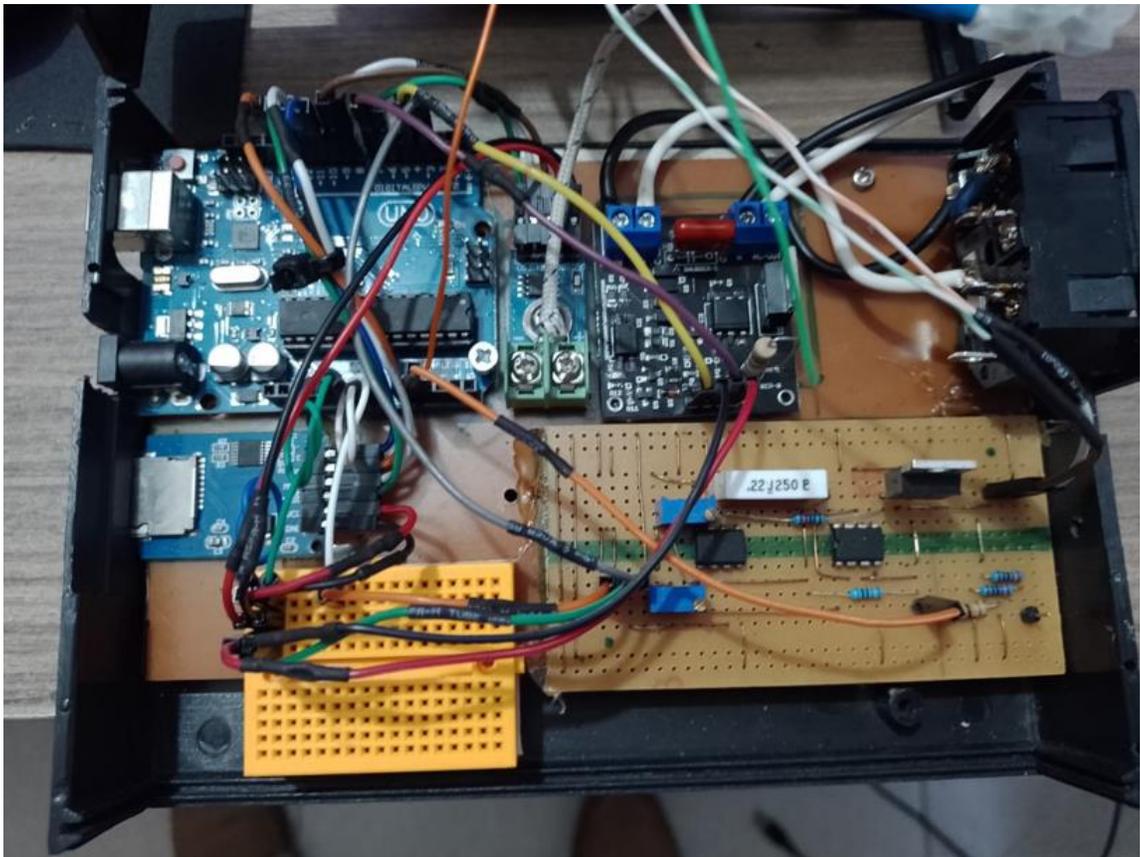
<b><math>K_p</math></b>	250
<b><math>K_i</math></b>	7.2
<b><math>K_d</math></b>	1.5

Fuente: elaboración propia.

#### 8.4 MONTAJE FINAL PROTOTIPO

A continuación, en la Figura 16 se presenta el montaje electrónico utilizado para el prototipo del sistema de medición de propiedades eléctricas, donde se aprecian cada uno de los módulos y componentes necesarios para su funcionamiento. De igual forma, en la Figura 17 se muestra el montaje general del prototipo final que incluye la cámara de muestras en acero inoxidable y la caja de circuitería.

Figura 16. Montaje electrónico realizado para el prototipo del sistema de medición de propiedades eléctricas.



Fuente: elaboración propia.

Figura 17. Montaje del prototipo final del sistema de propiedades eléctricas.



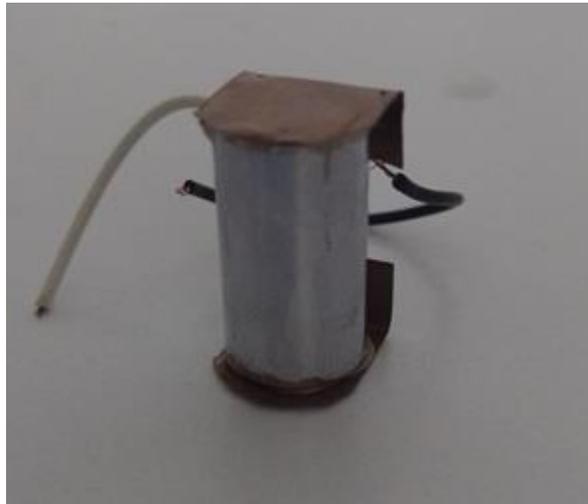
Fuente: elaboración propia.

## 9. DESARROLLO TERCER OBJETIVO

### 9.1 REALIZACIÓN DE MEDIDAS DE RESISTIVIDAD

Una vez finalizado el montaje del prototipo final, se procedió a realizar una serie de medidas de resistividad en una muestra óhmica de aleación de hierro con la finalidad de verificar la funcionabilidad del sistema. El material utilizado para realizar las mediciones y sus características se muestran en la Figura 18 y en la tabla 9.

Figura 18. Muestra óhmica de aleación de hierro para la elaboración de graficas de resistividad en función de la temperatura.



Fuente: elaboración propia.

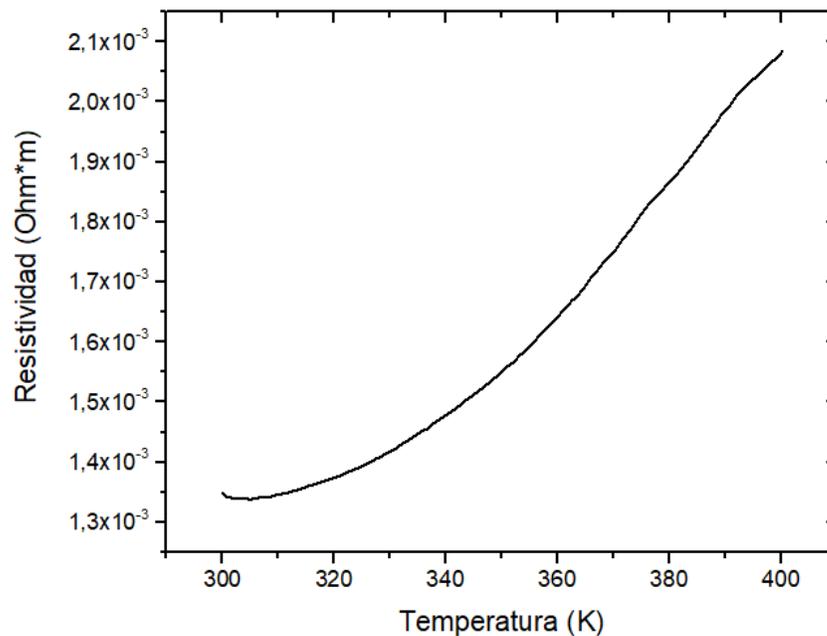
Tabla 9. Características físicas de la muestra escogida como analito de pruebas.

<b>MATERIAL</b>	Aleación de hierro
<b>GEOMETRÍA</b>	Cilíndrica
<b>LONGITUD</b>	$21.30 \times 10^{-3} \text{ m} \pm 0.05 \times 10^{-3} \text{ m}$
<b>ÁREA TRANSVERSAL</b>	$94.89 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \pm 0.71 \times 10^{-6} \text{ m}^2$

Fuente: elaboración propia.

Con la aleación metálica se realizaron las pruebas de medición de resistividad con el sistema construido, en donde se eleva la temperatura del material, se hace circular una corriente eléctrica constante de 50 mA y se mide la caída de potencial en la muestra. Efectuado el proceso anterior, se obtuvieron los siguientes resultados, los cuales se muestran en la Figura 19.

Figura 19. Curva de resistividad en función de la temperatura para el material de pruebas seleccionado, obtenidas con el sistema de medición construido.



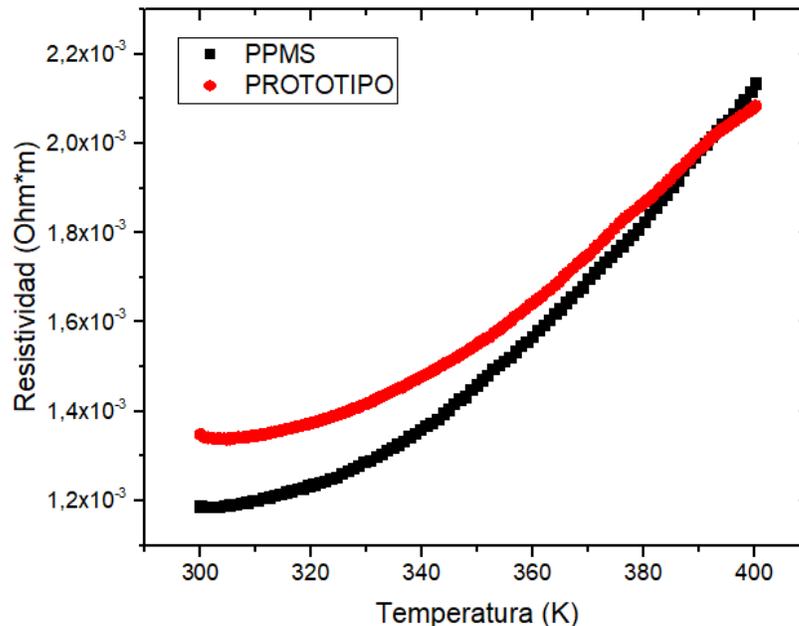
Fuente: elaboración propia.

## 9.2 COMPARACIÓN MEDIANTE ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Una vez obtenida la curva de resistividad en función de la temperatura para el analito utilizado en las pruebas, se realizó el análisis estadístico comparativo Chi – cuadrado haciendo uso de la herramienta Excel, con los resultados obtenidos mediante el dispositivo PPMS EVERCOOL de la marca americana QUANTUM DESING, el cual se encuentra en el Centro de Excelencia en Nuevos Materiales CENM de la Universidad del Valle. En este análisis se realizó la comparación de cada uno de los puntos que componen las gráficas con el fin de determinar el grado

de concordancia o discrepancia existente entre ellas. En la Figura 20 se muestra la comparación de las gráficas obtenidas para la muestra mediante el uso del prototipo versus el instrumento especializado y, de igual forma, en la tabla 10 se observa el valor estadístico de Chi – cuadrado que se obtuvo mediante la herramienta Excel. Posteriormente, se obtuvieron los valores de resistividad de cada una de las gráficas en el intervalo de temperatura de 300 K a 400 K, debido a que esta es la temperatura máxima de operación del dispositivo PPMS EVERCOOL. Dichos valores obtenidos se pueden evidenciar en la tabla 11.

Figura 20. Comparación de las curvas de resistividad en función de la temperatura para el material de pruebas seleccionado, obtenidas con el sistema de medición PPMS EVERCOOL y el prototipo construido.



Fuente: elaboración propia.

Tabla 10. Valores del estadístico Chi – cuadrado obtenido para las gráficas realizadas.

<b>VARIABLES DE COMPARACIÓN</b>	<b><math>\chi^2</math></b>
VALORES DE TEMPERATURA Y RESISTIVIDAD OBTENIDOS PARA PROTOTIPO VS. PPMS	1

Fuente: elaboración propia.

Tabla 11. Valores de resistividad obtenidos mediante la utilización de los sistemas de medición.

<b>TEMPERATURA</b>	<b>300 K</b>	<b>400 K</b>
<b>VALOR DE RESISTIVIDAD DEL MATERIAL EN EL SISTEMA DE MEDICIÓN CONSTRUIDO</b>	$1.3 \times 10^{-3} \Omega \cdot m$	$2.1 \times 10^{-3} \Omega \cdot m$
<b>VALOR DE RESISTIVIDAD DEL MATERIAL EN EL SISTEMA DE MEDICIÓN PPMS EVERCOOL</b>	$1.190 \times 10^{-3} \Omega \cdot m$	$2.140 \times 10^{-3} \Omega \cdot m$

Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla 10, se obtuvo un valor de 1 para el estadístico Chi – cuadrado, lo que significa que los datos obtenidos con el prototipo para la muestra seleccionada, son aceptables en comparación con el comportamiento esperado según el instrumento patrón. Con base en el inciso 7.1.5.2 de la norma ISO 9001:2015 el cual habla sobre la trazabilidad de las mediciones, se consideró como instrumento patrón al sistema de medición PPMS EVERCOOL y de esta misma forma, el valor de resistividad obtenido con este instrumento. Una vez dicho lo anterior, se procedió a calcular el error porcentual simple de la medida de resistividad obtenida con el sistema de medición construido, lo que indica que tan

inexacta es la medición realizada con relación al patrón de medida asumido. Como resultado se obtuvieron unos errores porcentuales de 10 % a 300 K (temperatura ambiente) y de 5 % a 400 K.

### 9.3 ANÁLISIS FINANCIERO DEL SISTEMA

#### 9.3.1 Costos del prototipo

En la tabla 12 se presenta el costo en pesos colombianos (COP) y la descripción de cada uno de los elementos que fueron necesarios para la construcción del sistema de medición de magnitudes eléctricas mencionado en este documento.

Tabla 12. Costo de materiales necesarios para la construcción del prototipo.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD (UND)	COSTO POR UND (COP)	COSTO TOTAL (COP)
1	Arduino LEONARDO	4	\$ 97.580	\$ 390.320
2	Fuente de voltaje DC REF. DPS5020-USB-BT	2	\$ 277.270	\$ 554.540
3	Multímetro digital UNI-T-UT61C	2	\$ 247.044	\$ 494.088
4	Sensor de temperatura Termocupla Tipo K + módulo MAX 6675	2	\$ 26.180	\$ 52.360
5	Módulo lector de tarjetas microSD + tarjeta microSD	2	\$ 32.725	\$ 65.450
6	Módulo de potencia por control de ángulo de fase SUTAGAO	1	\$ 84.157	\$ 84.157
7	Módulo de potencia por control de ángulo de fase BT 139 800E	1	\$ 71.400	\$ 71.400
8	Módulo sensor de corriente 5A	1	\$ 8.449	\$ 8.449
9	Módulo sensor de voltaje 0,02445V ~ 25V	1	\$ 3.213	\$ 3.213

10	Módulo sensor activo de fase AC	1	\$ 14.161	\$ 14.161
11	Modulo fuente de voltaje LM2596	1	\$ 9.401	\$ 9.401
12	Modulo pantalla LCD	3	\$ 20.230	\$ 60.690
13	Potenciómetro Trimmer 20KΩ	4	\$ 952	\$ 3.808
14	Resistencia tipo banda 126Ω	1	\$ 47.600	\$ 47.600
15	Cámara de muestras en inoxidable cilíndrica	1	\$ 119.000	\$ 119.000
16	Amplificador operacional OP07	4	\$ 3.570	\$ 14.280
17	Transistores MOSFET IRLZ44N	6	\$ 4.665	\$ 27.989
18	Resistencias eléctricas de precisión. Paquete X10 und, ohmiaje variado.	4	\$ 6.545	\$ 26.180
19	PCB universal	4	\$ 4.760	\$ 19.040
20	Caja plástica para circuitería	1	\$ 23.800	\$ 23.800
21	Bisagras	2	\$ 2.380	\$ 42760
22	Borneras	5	\$ 952	\$ 4.760
23	Cables de conexión	1	\$ 23.800	\$ 23.800
24	Adaptador 20V - 1A	1	\$ 17.850	\$ 17.850
<b>COSTO TOTAL MATERIALES (COP)</b>				<b>\$ 2.141.096</b>

Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente, dentro de este listado de materiales necesarios se tuvo en cuenta la mano de obra directa utilizada durante la ejecución de este proyecto (ver tabla 13). En este consolidado se puede evidenciar la cantidad de colaboradores que participaron en el desarrollo, así como sus respectivas horas de trabajo y su costo asignado.

Tabla 13. Costo de mano de obra directa.

<b>NOMBRE</b>	<b>NIVEL ACADÉMICO</b>	<b>TIEMPO LABORADO (Hrs)</b>	<b>COSTO X HORA LABORADA (\$COP)</b>	<b>COSTO TOTAL (\$COP)</b>
John Schneider Betancourt Ramírez	Magister	192	\$ 21.250	\$ 4'080.000
Jose Daniel Salazar Hernández	Ingeniero	384	\$ 7.813	\$ 3'000.192
Servicios Técnicos de Metalmeccánica	Técnico	10	\$ 7.813	\$ 78.130
<b>TOTAL MANO DE OBRA DIRECTA</b>				<b>\$ 7'158.322</b>

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a lo anterior, el valor totalizado para inversión inicial del prototipo de un sistema de medición de magnitudes eléctricas basado en Arduino sería de \$ 9.299.418 COP. Con base en lo anterior, se puede analizar la oportunidad de comercializar el sistema en un valor final de \$ 3.500.000 COP por unidad, garantizando un margen de ganancia de \$ 1.069.250 COP (30.55 % aproximadamente).

### 9.3.2 Descripción del producto y precio de venta final

El precio final de venta incluye la adquisición de un horno compuesto de una cámara de muestras fabricada en acero inoxidable y una resistencia tipo banda del mismo material. El horno opera en un rango de temperatura de 300 K a 500 K, en tensiones de 110VAC – 120VAC. También se hace entrega de un módulo basado en arquitectura Arduino, el cual consta de sensores de voltaje, corriente y de

temperatura para la adquisición de datos. También cuenta internamente con un módulo datalogger compatible con memorias microSD que se encarga de la captura y almacenamiento de los datos que se deseen guardar. Adicionalmente, el módulo cuenta con dos modelos de prácticas predefinidas, para su implementación en laboratorios académicos. Vale la pena resaltar que la funcionalidad del sistema se encuentra verificado según los lineamientos de la norma internacional ISO 9001 de 2015, capítulo número 7: Apoyo, inciso 7.1.5.2 trazabilidad de las mediciones; tomando en consideración un instrumento patrón de alta gama como lo es el PPMS EVERCOOL de la marca americana QUANTUM DESING, el cual se encuentra en el Centro de Excelencia en Nuevos Materiales CENM de la Universidad del Valle.

### 9.3.3 Detección de oportunidad en el mercado

Por otra parte, según datos obtenidos de la (Secretaria de Educacion de Santiago de Cali, 2022), actualmente la ciudad cuenta con 92 instituciones educativas oficiales registradas. De igual forma, con base en otras fuentes de información, Cali cuenta con alrededor de 940 colegios privados en funcionamiento. Con base en esta información, podemos decir que la ciudad de Cali cuenta con 1.032 colegios habilitados para la enseñanza académica, de los cuales alrededor de 630 se encuentran facultados para impartir básica secundaria (OFEC, 2022).

Con base en la revisión de documentos y a la opinión de diferentes expertos, se establece la hipótesis de que aproximadamente el 10 % de los colegios (60 colegios) avalados para la educación básica secundaria de la ciudad de Cali adquiera el sistema para implementarlo en sus asignaturas aplicables, y suponiendo que cada colegio requiera mínimo un dispositivo, y que se necesita un capital inicial de producción de aproximadamente \$ 6.200.000 COP, se supone una producción mensual de 5 unidades en el lapso de un año, lo cual representa un ingreso bruto mensual de \$ 17.500.000 COP. A este valor anterior se le realizan las deducciones correspondientes por concepto de pago al préstamo inicial para inicio de producción

(30.6 %), materiales utilizados, arrendamiento de local, salario del técnico que se encargará del ensamble, mantenimiento y servicio postventa, así como el servicio de metalmecánica para la cámara del horno, con lo cual se tiene un ingreso neto total mensual proyectado de \$ 4.084.544 COP para el primer mes y de 11.300.000 COP para los meses siguientes. Toda esta información se presenta en la siguiente tabla (ver tabla 14) (Navarro Osorio, 2020).

Tabla 14. Ingresos y costos para la venta del sistema de medición.

<b>INVERSIÓN INICIAL PARA EL PRIMER PROTOTIPO (COP)</b>	\$ 9.299.418
<b>PÚBLICO OBJETIVO</b>	100 colegios
<b>CANTIDAD UNIDADES A PRODUCIR MENSUAL</b>	9 unidades
<b>PRECIO DE VENTA POR UNIDAD (COP)</b>	\$ 3.500.000
<b>CAPITAL PARA INICIO DE PRODUCCIÓN NECESARIO (COP)</b>	\$ 6.200.000
<b>TOTAL CAPITAL PARA INICIO DE PRODUCCIÓN + INTERESES (30.6%) (COP)</b>	\$ 7.215.456
<b>INGRESOS MENSUALES BRUTOS (COP)</b>	\$ 17.500.000
<b>COSTO MENSUAL POR CONCEPTO DE MATERIALES (COP)</b>	\$ 3.927.715
<b>COSTO MENSUAL POR CONCEPTO DE ARRENDAMIENTO (COP)</b>	\$ 700.000
<b>COSTO MENSUAL TÉCNICO DE ENSAMBLE (COP)</b>	\$ 1.117.172
<b>COSTO MENSUAL SERVICIO DE METALMECÁNICA (COP)</b>	\$ 390.650
<b>INGRESOS MENSUALES NETOS A PARTIR DEL SEGUNDO MES (COP)</b>	<b>\$ 11.300.000</b>

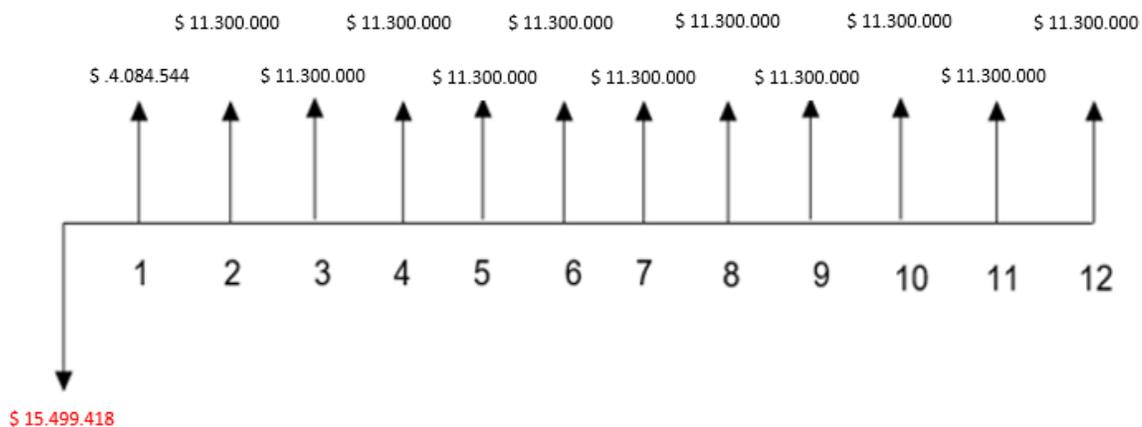
Fuente: elaboración propia.

Luego de obtener estos resultados, se procedió a calcular los indicadores VPN y TIR con el fin de analizar y evaluar la factibilidad de la oportunidad de mercado detectada.

### 9.3.4 Cálculos financieros para la toma de decisiones.

El indicador VAN (Valor Presente Neto) trae todos los flujos de caja estimados al tiempo presente, según una tasa de interés determinada. Para este caso se tuvo en cuenta una tasa de descuento del 30.6%, como una aproximación a la tasa efectiva anual que se proporciona en las entidades bancarias para otorgar créditos de libre inversión en Colombia (Avvillas, 2022). Para los flujos de caja se estima el valor de \$ 4.084.544 COP para el primer mes y \$ 11.300.000 COP para los meses siguientes, que corresponden a los ingresos mensuales libres de deducibles por la venta de los sistemas de medición proyectados (ver Figura 21).

Figura 21. Esquema de inversión inicial y flujos de caja por periodo.



Fuente: elaboración propia.

Al realizar el cálculo del VPN se obtuvo como resultado el valor positivo de \$ 13.945.071 COP, con lo cual se pudo deducir que la inversión requerida para el proyecto es rentable. Del mismo modo y para complementar esta decisión, se

realizó el cálculo de la TIR (Tasa Interna de Retorno) el cual, al igual que el VPN, su finalidad es la de valorar si la inversión de un proyecto es rentable o no. Para el cálculo de la TIR se hizo uso de los mismos flujos de caja establecidos para el cálculo del VAN y con estos datos se procedió a calcular aquella tasa de descuento con la cual el VPN es igual a cero, es decir, que después de haber pasado un año, se retorna exactamente el mismo valor invertido en el proyecto (ver tabla 15).

Tabla 15. Cálculo de la TIR para la inversión en el sistema de medición.

<b>TASA DE DESCUENTO (%)</b>	<b>PERIODO</b>	<b>INVERSIÓN INICIAL Y FLUJOS DE CAJA POR PERIODO (COP)</b>
30.6%	0	(\$ -15.499.418)
	1	\$ 4.084.544
	2	\$ 11.300.000
	3	\$ 11.300.000
	4	\$ 11.300.000
	5	\$ 11.300.000
	6	\$ 11.300.000
	7	\$ 11.300.000
	8	\$ 11.300.000
	9	\$ 11.300.000
	10	\$ 11.300.000
	11	\$ 11.300.000
	12	\$ 11.300.000
<b>VPN (COP)</b>		<b>\$ 13.945.071</b>
<b>TIR (%)</b>		<b>56%</b>

Fuente: elaboración propia.

Una vez dicho lo anterior, siendo el cálculo del VPN positivo (\$ 13.945.071 COP) y que al calcular la TIR arrojó que esta es mayor a la tasa de descuento que se usó de referencia (56% > 30.6%), se puede afirmar que la inversión inicial requerida para la oportunidad de mercado detectada es rentable.

### 9.3.5 Análisis de costos con otros sistemas disponibles

Para comparar la funcionalidad y costo de adquisición del sistema de medición construido, se utilizó otra opción disponible en el mercado que permite la realización de medidas de propiedades eléctricas en materiales óhmicos, a base de fuentes de laboratorios, multímetros digitales y su respectiva estación de calentamiento. A continuación, en la tabla 16 se muestra los costos asociados a la compra de los componentes necesarios para el montaje del sistema anteriormente nombrado.

Tabla 16. Costos de materiales y equipos necesarios para el montaje de un sistema de mediciones de magnitudes eléctricas convencional.

ÍTEM	CANTIDAD (UND)	VALOR UNITARIO (COP)	VALOR TOTAL (COP)
Fuente De Alimentación De Laboratorio Conmutación 30 V - 5 A.	2	\$ 732.611	\$ 1.465.222
Multímetro y multitester digital Triplett Cat Iv 4000 Ref: 9055.	2	\$ 757.300	\$ 1.514.600
Kit Cables Multímetro Fluke - Astroai - Innova - Kaiweets - Triple Cat.	2	\$ 95.500	\$ 191.000
Plancha de calentamiento 350°C – 200W JOANLAB Ref: HS-19.	1	\$ 1.499.999	\$ 1.499.999
<b>TOTAL</b>			<b>\$ 4.670.821</b>

Fuente: elaboración propia con base a precios 2022 dispuestos en Mercado Libre Colombia.

Al comparar los costos de adquisición de un sistema de medición basado en fuentes de laboratorio, con el precio de venta estipulado en el inciso 10.3.1 (\$ 3.500.000 COP) para el dispositivo presentado en este documento, se obtuvo un ahorro de \$ 1.170.821 COP (25.06%) en la adquisición de la segunda opción con respecto a la primera, demostrando la viabilidad financiera del proyecto. De igual forma, vale la pena resaltar que este sistema es producto de la labor realizada en el semillero de investigación INGENIO EXACTO, lo cual otorga un valor agregado al dispositivo y presenta un punto de partida para que tanto estudiantes y profesores, desarrollen propuestas que permitan la mejora continua e innovación del producto.

## 10. CONCLUSIONES

Se realizó el diseño del sistema de mediciones de propiedades eléctricas de acuerdo a los requerimientos técnicos considerados necesarios, para ofrecer al laboratorio de física de la Fundación Universitaria Católica Lumen Gentium, sede Meléndez, un producto de calidad y económicamente asequible; con el cual se puede potenciar el componente teórico – práctico de las asignaturas de ciencias básicas de las carreras de ingeniería.

Se construyó un sistema de mediciones de magnitudes eléctricas con materiales resistentes, reciclados y reutilizados, haciendo uso de tecnologías emergentes de software y hardware libre, con la posibilidad de ser implementado en las prácticas de laboratorio de las asignaturas de ciencias básicas de la Fundación Universitaria Católica Lumen Gentium. De igual forma, el sistema está compuesto por piezas y elementos comerciales, lo cual facilita su reparación y mantenimiento.

Se identificó una oportunidad de mercado para los sistemas de medición de propiedades eléctricas para aplicaciones didácticas, dado su bajo costo de adquisición para colegios privados y oficiales, así como el aporte que genera su implementación en asignaturas de ciencias básicas como física. Cabe resaltar que lo anterior también puede ser aplicado en instituciones para la educación técnica, tecnológica y profesional del país.

Se identificó que el prototipo final construido resulta favorable desde un punto de vista económico, dado que se encontró que su valor está por debajo en comparación con otro sistema similar basado en el uso de fuentes de laboratorio. De igual forma, los indicadores VPN y TIR determinan que este es un proyecto factible con retornos positivos en el periodo de un año, según las condiciones y demanda proyectadas.

Se evaluó la funcionalidad técnica del sistema de medición mediante su comparación con el dispositivo PPMS EVERCOOL de la marca americana QUANTUM DESING. Por medio de este proceso se pudo comprobar que el dispositivo construido cumple de manera exitosa con la función para la cual fue diseñado, la cual es medir la resistividad en materiales óhmicos con una incertidumbre de medida del 10 % a temperatura ambiente. Esta verificación del funcionamiento del sistema es válida mediante la premisa de que el dispositivo será usado para aplicaciones didácticas y académicas.

## 11. RECOMENDACIONES

Se recomienda generar los espacios adecuados de investigación en los semilleros de investigación como INGENIO EXACTO, con el fin de desarrollar propuestas de mejora para la implementación de nuevas funcionalidades en el sistema actual, con base en el entorno de Arduino.

Se recomienda que tanto estudiantes como profesores hagan uso de los elementos de protección personal establecidos para la realización de actividades en espacios de experimentación (laboratorios) con este sistema de medición. Lo anterior con el fin de evitar lesiones severas como quemaduras en las extremidades debido a una inadecuada manipulación.

Se recomienda hacer énfasis en que los estudiantes deben seguir las indicaciones que plantean las guías de trabajo en el laboratorio entregadas por los profesores y de las indicaciones que den a lugar. Se debe recalcar a los estudiantes que no pueden realizar conexiones ni manipular la cámara de muestras sin explícita autorización y supervisión del docente a cargo.

Se recomienda que tanto estudiantes y profesores se mantengan a una distancia de más o menos un metro, mientras el dispositivo se encuentre en funcionamiento. De igual forma, se recomienda esperar un periodo de 60 minutos entre prácticas, con el fin de que el sistema enfríe y así mitigar el riesgo de lesiones al manipularlo.

Se recomienda llevar un registro de pruebas de sensado de la termocupla en periodos de tiempo definidos, con el fin de llevar un control de la vida útil de estos componentes para su reemplazo o calibración.

Se recomienda que para una segunda fase del proyecto, se pueda profundizar en la adecuación de la interfaz de con el fin de integrar más funcionalidades, posibilidades de parametrización y mejorar la comunicación usuario - maquina. Del

mismo modo, continuar con la implementación de un convertidor análogo – digital, con la finalidad de potenciar la resolución del sistema y garantizar la medición de resistividad en otros materiales.

## 12. BIBLIOGRAFÍA

- Alonso, R. (07 de Abril de 2022). *Hardzone.es*. Obtenido de <https://hardzone.es/tutoriales/componentes/memoria-ram-rom-diferencias/>
- Antivar Soto, M. A., & Cárdenas Meneces, G. (2018). *Propuesta para el montaje de un laboratorio de producción, logística y finanzas como apoyo pedagógico a la división de ciencias económicas e ingeniería y arquitectura dirigido a la Universidad Santo Tomas Bucaramanga*. . Bucaramanga: Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación, CRAI-Biblioteca.
- Aprendiendoarduino. (20 de 02 de 2020). *Aprendiendoarduino.com*. Obtenido de <https://www.aprendiendoarduino.com/2017/05/22/video-2-instalacion-ide-arduino/#:~:text=Que%20es%20el%20IDE%20de,bien%20puede%20utilizarse%20para%20varios.>
- Arduino. (20 de 02 de 2022). *Arduino.cc*. Obtenido de <https://www.arduino.cc/>
- Avvillas. (22 de Mayo de 2022). *avvillas.com.co*. Obtenido de <https://www.avvillas.com.co/wps/portal/avvillas/banco/banca-personal/simulador-credito-libre-inversion/>
- Bauer, W., & Westfall, G. D. (2011). *Física para ingeniería y ciencias con física moderna*. The McGraw-Hill.
- Capote León, G., Rizo Rabelo, N., & Bravo López, G. (2016). La formación de ingenieros en la actualidad. Una explicación necesaria. *Revista Universidad y Sociedad*, 21-28. Obtenido de <https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus>
- Carbosystem. (23 de Marzo de 2022). *carbosystem.com*. Obtenido de <https://carbosystem.com/tipos-de-hornos-industriales/>
- Carrillo, A. (02 de Abril de 2022). *Biblogtecarios.es*. Obtenido de <https://www.biblogtecarios.es/anacarrillo/arduino-intercambio-y-generacion-de-conocimiento/>
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2012). *Termodinamica*. The McGraw-Hill.

- Congreso de la República. (29 de diciembre de 1992). *Ley 30 de 1992. Por la cual se organiza el servicio público de la Educación Superior*. D.O. No. 40.700.
- Congreso de la República. (8 de febrero de 1994). *Ley 115 de 1994. Por la cual se expide la ley general de educación*. D.O. No. 41.214.
- Construmatica. (20 de 02 de 2020). *Construmatica.com*. Obtenido de <https://www.construmatica.com/construpedia/Shunt>
- Corona Ramírez, L., Abarca Jiménez, G., & Mares Carreño, J. (2014). *Sensores y actuadores: Aplicaciones con Arduino*. Azcapotzalco: Grupo Editorial Patria.
- Dominguez, M., Almudena, A., Angel, J. A., Blanco, E., Bomatti, O., Gonzalez-Leal, J. M., . . . Mena-Lorenzo, J. L. (s.f.). *Mejorando una práctica del laboratorio docente de Física mediante el uso de Arduino y sensores de bajo coste*.
- Gálvez Mora, M. (2020). *Sistema electrónico para control del climatizador de un vehículo*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Gnu. (20 de 02 de 2020). *Gnu.org*. Obtenido de <https://www.gnu.org/philosophy/free-sw.es.html>
- Gonzalez Flores, L. A., & Sanchez Marquez, J. A. (2017). Diseño de un sistema de medida de la temperatura, humedad e intensidad luminosa basado en el uso del microcontrolador Arduino. *Jovenes en la ciencia*, 1-6.
- Harrison, L. (2005). *Current sources & voltage references*. Oxford: Newnes publications.
- Hernández Gaviño, R. (2010). *Introducción a los sistemas de control*. Naucalpan de Juárez: Prentice Hall.
- Indutecsa. (23 de Marzo de 2022). *indutecsa.com*. Obtenido de <https://www.indutecsa.com/index.php/noticias/15-hornos-de-induccion-como-funcionan>

- ISO. (2015). *Norma técnica colombiana NTC - ISO 9001:2015*. Bogotá: Icontec Internacional.
- Johnson, M. A., & Moradi, M. H. (2005). *PID Control*. Springer.
- Kanthal. (23 de Marzo de 2022). *kanthal.com*. Obtenido de <https://www.kanthal.com/es-es/aplicaciones/hornos/>
- Kreith, F., Manglik, R. M., & Bohn, M. S. (2012). *Principios de transferencia de calor* (Septima edición ed.). México: Cengage Learning.
- López Rua, A. M., & Tamayo Alzate, Ó. E. (2012). Las prácticas de laboratorio en la enseñanza de las ciencias naturales. *Revista Latinoamericana de Estudios Educativos*, 145-166.
- Méndez, Á. (20 de 02 de 2020). *Quimica.laguia2000.com*. Obtenido de <https://quimica.laguia2000.com/general/analito>
- Moran, M. J., & Shapiro, H. N. (2006). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. John Wiley & Sons, Inc.
- Moreno Améstegui, M. (2001). *Apuntes de control PID*. La Paz: Universidad Mayor de San Andrés.
- Morse, I. E., & Francis, S. T. (2018). *Measurement and instrumentation in engineering: principles and basic laboratory experiments*. CRC Press.
- Najul, M. (2006). *Valoración de proyectos*. Caracas: Ediciones IESA.
- Navarro Osorio, V. (2020). *Diseño y construcción del sistema de apoyo para personas con visión reducida – SAPVIRE*. Cali.
- OFEC. (22 de Abril de 2022). *Ofecfuturoscientificos.com*. Obtenido de <http://www.ofecfuturoscientificos.com/colegios-cali-1399.html>
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna*. Madrid: Prentice Hall.

- Ordoñez, J. E., Sánchez, C. W., & Viera, V. (2017). *Use of free hardware and software in engineering educational process of Unicatólica*. Res. Eng. Educ. Symp. REES 2017, no. February 2018, 2017.
- Quimbita Mosquera, R. (2020). *Implementación de un horno automático de convección para el soldado de componentes electrónicos de montaje superficial*. Ibarra: Universidad Técnica del Norte.
- Raig. (20 de 02 de 2020). *Raig.com*. Obtenido de <https://www.raig.com/blog/rango-resolucion-y-precision-2b/#:~:text=La%20resoluci%C3%B3n%20es%20la%20m%C3%ADnima,de%20aquellos%20que%20estemos%20midiendo>.
- Ramírez, D. (2019). *Fuentes de alimentación*.
- Rashid, M. (1993). *Electrónica de potencia: Circuitos, dispositivos y aplicaciones*. Naucalpan de Juárez: Prentice Hall.
- Román Bueno, J., & González Mantilla, K. (s.f.). *Sistemas embebidos y Hardware libre*. Bucaramanga.
- Rus Arias, E. (08 de Mayo de 2022). *Economipedia.com*. Obtenido de <https://economipedia.com/definiciones/investigacion-cuantitativa.html>
- Saura Ródenas, P. (2020). *Desarrollo de un entorno para la monitorización remota de prácticas de laboratorio para sensores de temperatura*. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena.
- Savasgard, E. (2014). *Arduino 101 beginners guide*.
- Secretaria de Educacion de Santiago de Cali. (04 de Abril de 2022). *Cali.gov.co*. Obtenido de <https://www.cali.gov.co/educacion/publicaciones/159761/directorio-ieo/>
- Sedano Jimenez, A. (2019). *Control de posición de una bola mediante Arduino para el análisis de controladores PID*. Bilbao: Escuela de ingeniería de Bilbao.

Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2005). *Física para ciencias e ingeniería con física moderna*. México: Cengage Learning.

Software del Sol. (27 de Abril de 2022). *sdelSol.com*. Obtenido de <https://www.sdelsol.com/glosario/tasa-interna-de-retorno-tir/>

Solectroshop. (20 de 02 de 2020). *Solectroshop.com*. Obtenido de <https://solectroshop.com/es/blog/que-es-pwm-y-como-usarlo--n38#:~:text=PWM%20es%20una%20t%C3%A9cnica%20que,cuya%20se%C3%B1al%20portadora%20ser%C3%A1%20digital.>

Suárez, M. (2004). *Fuentes de Alimentación*. Balderas 95: Limusa Noriega Editores.

Torres, M. (27 de Abril de 2022). *Rankia.cl*. Obtenido de <https://www.rankia.cl/blog/mejores-opiniones-chile/3391122-tasa-interna-retorno-tir-definicion-calculo-ejemplos>

Urbe. (2022). *Capítulo V La propuesta*.

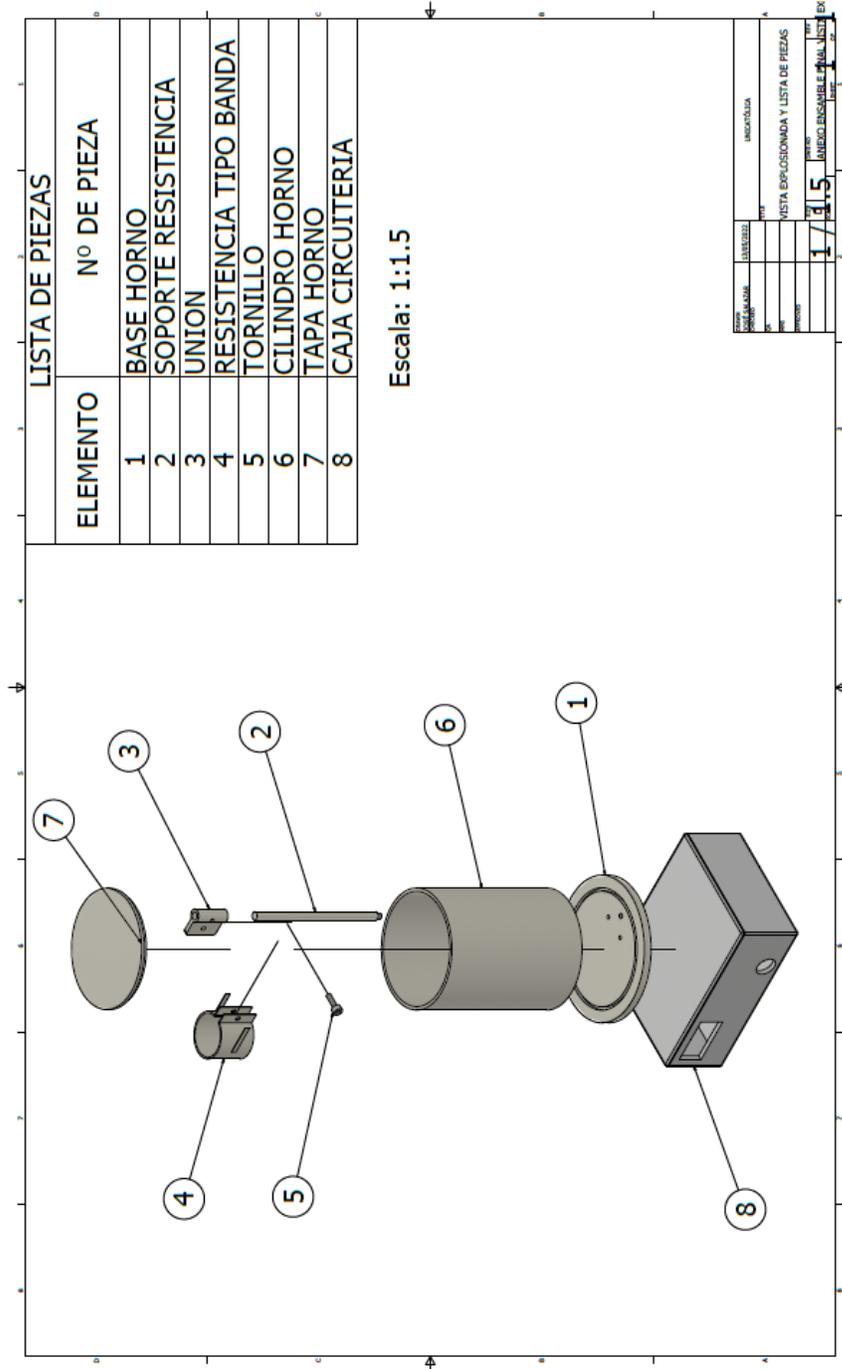
Vásquez Hidalgo, I. (07 de Abril de 2022). *Gestiopolis.com*. Obtenido de <https://www.gestiopolis.com/tipos-estudio-metodos-investigacion/>

Zagarramurdi, A., Parín, M. A., & Lupin, H. M. (1998). *Ingeniería económica aplicada a la industria pesquera*. Roma.

Zubowicz, I. (04 de Abril de 2022). *ianinazubowicz.medium.com*. Obtenido de <https://ianinazubowicz.medium.com/la-importancia-de-la-metodolog%C3%ADa-steam-para-el-medioambiente-y-las-artes-7026ddfd4d6d>

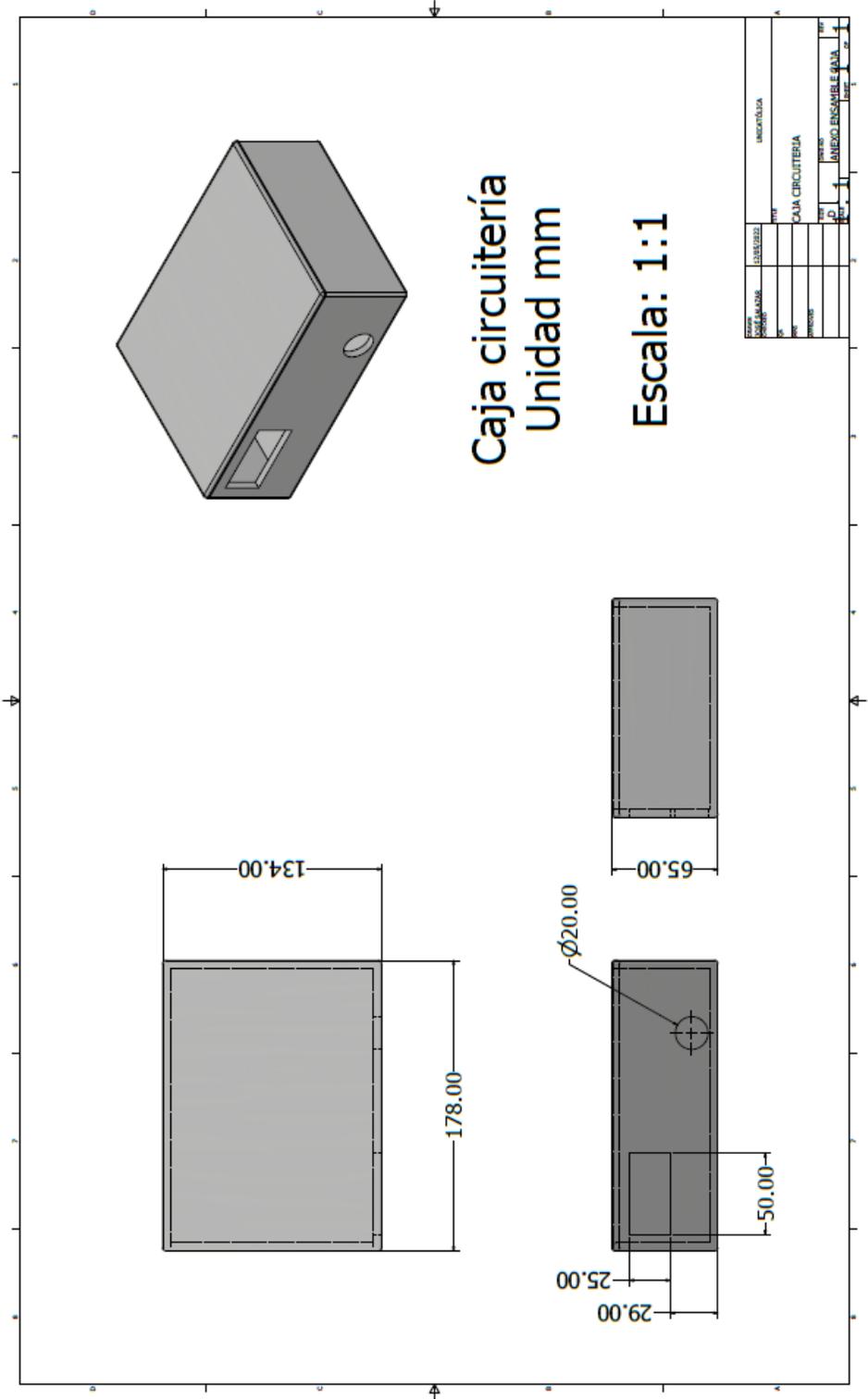
## ANEXOS

Anexo A. Plano general del sistema de medición de propiedades eléctricas. Fuente: elaboración propia mediante software CAD Inventor 2022, licencia estudiantil.

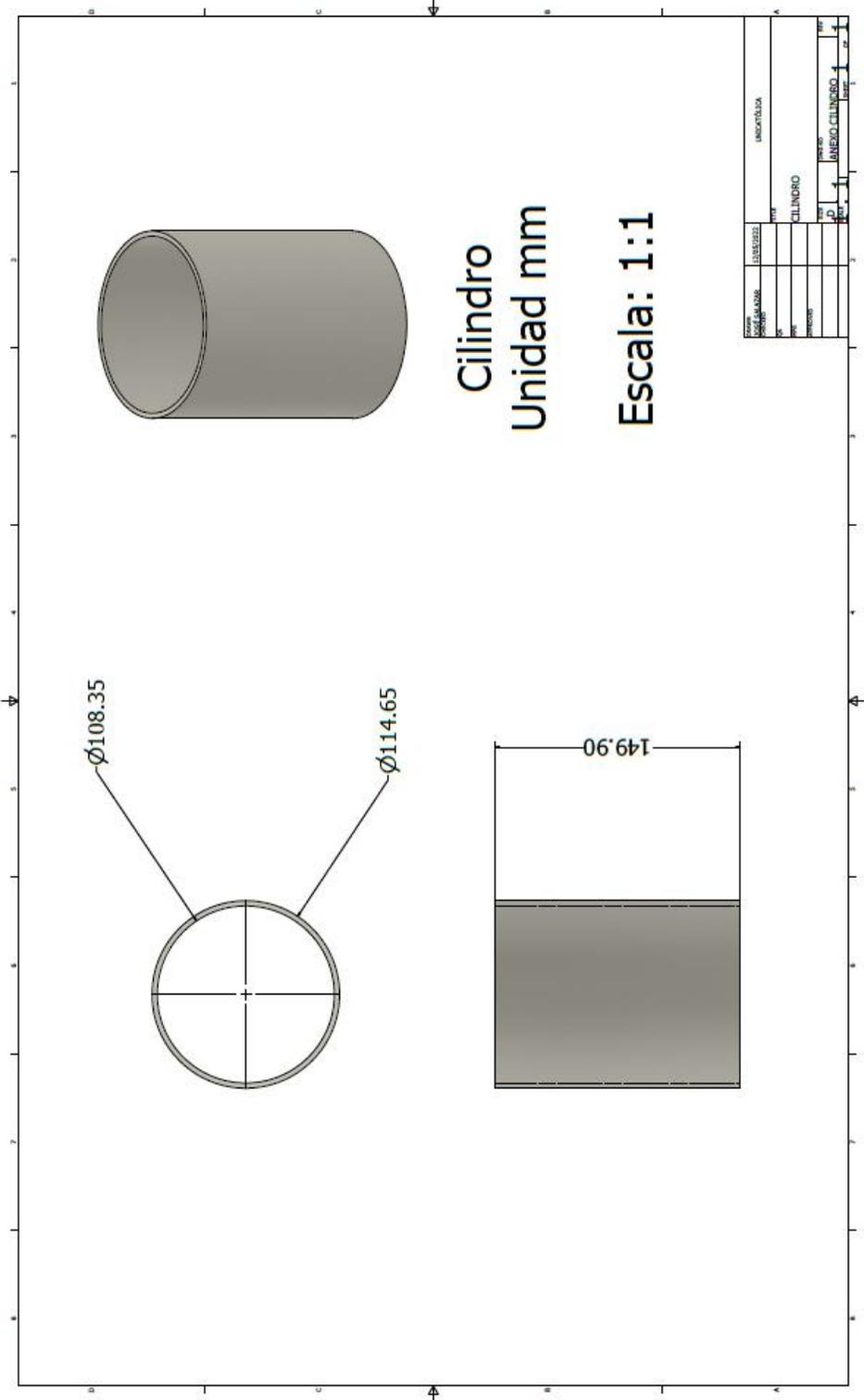




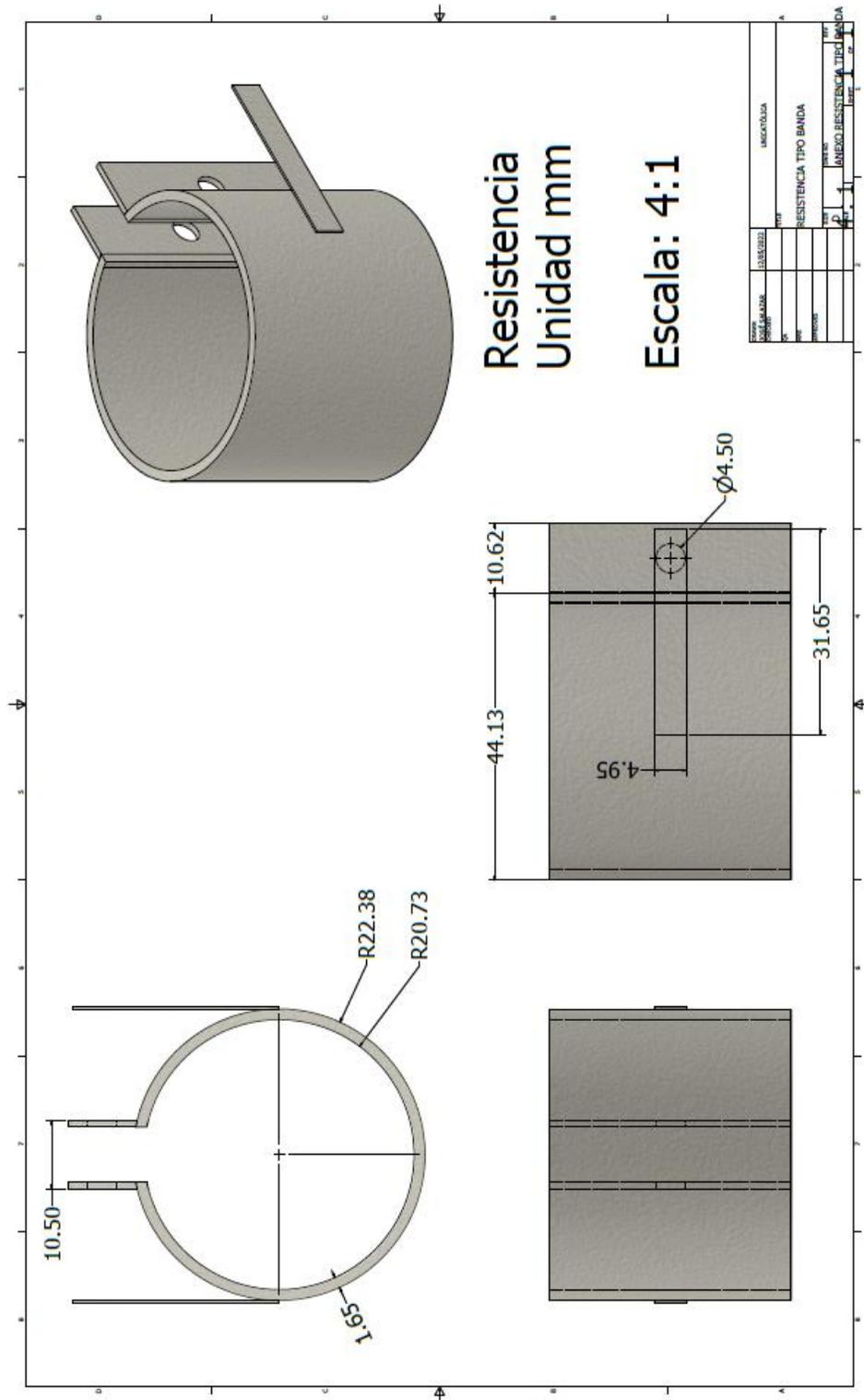
Anexo C. Plano caja de circuitería. Fuente: elaboración propia mediante software CAD Inventor 2022, licencia estudiantil.



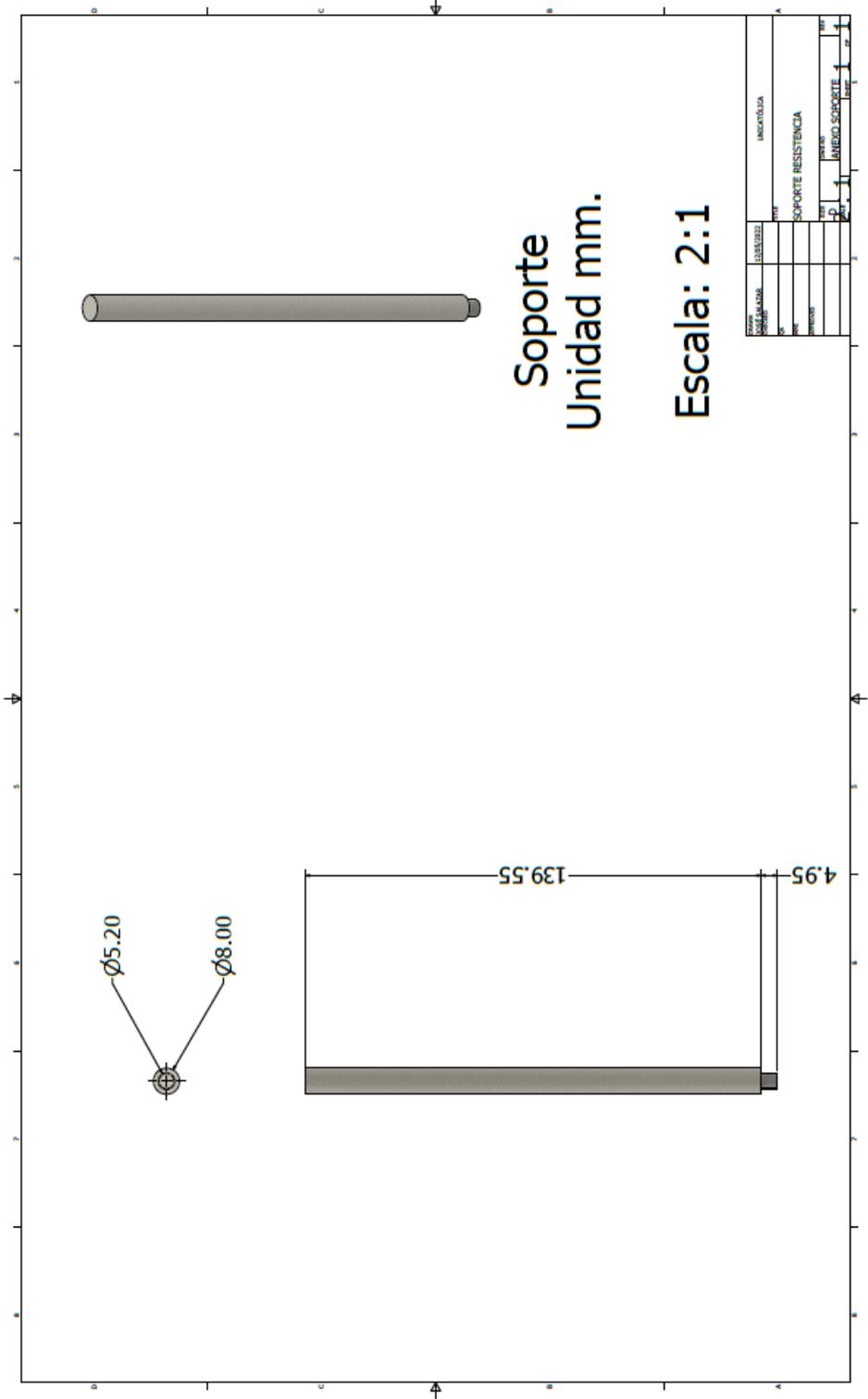
Anexo D. Plano cilindro. Fuente: elaboración propia mediante software CAD Inventor 2022, licencia estudiantil.



Anexo E. Plano resistencia tipo banda. Fuente: elaboración propia mediante software CAD Inventor 2022, licencia estudiantil.



Anexo F. Plano soporte. Fuente: elaboración propia mediante software CAD Inventor 2022, licencia estudiantil.



Anexo G. Plano tapa horno. Fuente: elaboración propia mediante software CAD Inventor 2022, licencia estudiantil.

