

**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción**

Diseño de un equipo automatizado para el reúso de sistemas  
inmovilizados en hidrólisis y fermentación

INGE-2210

**Proyecto Integrador**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero en Mecatrónica**

Presentado por:

José Jerry Landívar Guartatanga

Daniela Elizabeth Sánchez Orozco

Guayaquil - Ecuador

Año: 2023

## Dedicatoria

---

A mis padres y mi hermana que  
incentivaron mi curiosidad desde  
pequeño y estuvieron para mí todo el  
tiempo.

**José Jerry Landívar Guartatanga**

## Dedicatoria

---

A mi mamá, Carmen Orozco, por ayudarme a ser fuerte y darme la seguridad de que siempre estará para mí.

A mi papá, Wilson Sánchez, por enseñarme todo lo que sé y ser mi ejemplo a seguir.

A mi hermano, Wilson Sánchez, por ser la persona más importante para mí.

A mis abuelitos, Laura, Ángel y Alba, por quererme incondicionalmente.

A quien siempre ha apoyado mis sueños y creído en mí.

A mis amigos, que me acompañan en las buenas y en las malas.

**Daniela Elizabeth Sánchez Orozco**

## Agradecimientos

---

Gracias a Dios por tocar mi corazón y hacerme quien soy.

A nuestro tutor Livingston Castro, Msc., y los profesores Efraín Terán, Msc., y Sócrates, Ph. D., por su guía durante este proyecto.

Al emprendimiento Tu Obra 3D por sus servicios de impresión 3D que fueron fundamentales para este trabajo.

**José Jerry Landívar Guartatanga**

## Agradecimientos

---

Agradezco a Dios y a la Virgen María por brindarme todas mis capacidades y oportunidades.

A mi familia, por confiar en mí y hacer que nunca me sienta sola.

A nuestro tutor Livingston Castro, Msc., y los profesores Efraín Terán, Msc., y Sócrates, Ph. D., por su guía durante este proyecto.

A la empresa Idenova S.A. por su donación de materiales para el prototipo presentado.

**Daniela Elizabeth Sánchez Orozco**

## Declaración Expresa

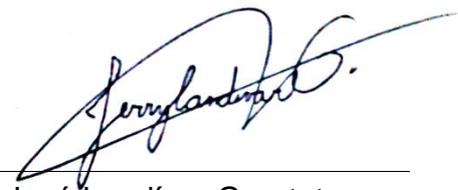
---

Nosotros José Jerry Landívar Guartatanga, y Daniela Elizabeth Sánchez Orozco acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores. La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 4 de febrero del 2024.



José Landívar Guartatanga



Daniela Sánchez Orozco

## Evaluadores

---

**Efraín Terán, M.Sc.**

Profesor de Materia

---

**Livingston Castro, M.Sc.**

Tutor de proyecto

## RESUMEN

La hidrólisis y fermentación son procesos bioquímicos aplicados en la elaboración de biocombustibles y de alimentos que conforman un tercio de la dieta humana. En estos, se emplean enzimas y microorganismos que representan altos costos (hasta el 49%), y largos tiempos de producción. En consecuencia, la comunidad científica propone el uso de nanopartículas magnéticas para reutilizar estos componentes mediante la aplicación de un campo magnético. No obstante, los experimentos realizados se limitan a pruebas manuales. Por esto, se diseñó y construyó un prototipo para automatizar la reutilización de enzimas y microorganismos. En este, se emplearon electroimanes, escogiendo sus dimensiones y materiales apropiados para generar el campo magnético deseado. Se comprobó que estos pueden atraer las enzimas y retenerlas impidiendo su extracción durante la descarga del líquido. Además, se controlaron las variables de temperatura, velocidad de agitación y acidez, utilizando una tarjeta de desarrollo ESP32 para implementar los controladores correspondientes. Se lograron estabilizar todas las variables en diferentes valores de referencia manteniendo variaciones dentro de la tolerancia admitida por el cliente. Finalmente, se programó una interfaz gráfica utilizando una pantalla táctil, que permitió al usuario visualizar las variables del proceso y modificar los valores de referencia.

**Palabras Clave:** Campo magnético, automatización, controladores, hidrólisis, fermentación.

## ABSTRACT

*Hydrolysis and fermentation are biochemical processes applied in the production of biofuels and foods that constitute one-third of the human diet. In these processes, enzymes and microorganisms are employed, representing high costs (up to 49%) and long production times. Consequently, the scientific community proposes the use of magnetic nanoparticles to reuse these components by applying a magnetic field. However, experiments conducted so far have been limited to manual tests. Therefore, a prototype was designed and built to automate the reuse of enzymes and microorganisms. Electromagnets were used, choosing their dimensions and materials appropriately to generate the desired magnetic field. It was verified that these magnets can attract enzymes and retain them, preventing their extraction during liquid discharge. In addition, variables such as temperature, stirring speed, and acidity were controlled using an ESP32 development board to implement the corresponding controllers. All variables were stabilized at different reference values, maintaining variations within the tolerance accepted by the client. Finally, a graphical interface was programmed using a touchscreen, allowing the user to visualize the process variables and modify the reference values.*

*Keywords: Magnetic field, automation, controllers, hydrolysis, fermentation.*

## ÍNDICE GENERAL

Resumen .....	I
Abstract .....	II
Índice general .....	III
Abreviaturas .....	VI
Simbología.....	VII
Índice de figuras .....	VIII
Índice de tablas .....	XI
ÍNDICE DE PLANOS.....	XII
Capítulo 1 .....	1
1. Introducción .....	2
1.1 Descripción del problema .....	4
1.2 Justificación del problema .....	6
1.3 Objetivos .....	8
1.3.1 Objetivo general .....	8
1.3.2 Objetivos específicos .....	8
1.4 Marco teórico.....	8
1.4.1 Hidrólisis y fermentación .....	8
1.4.1.1 Influencia de la temperatura en hidrólisis y fermentación .....	9
1.4.1.2 Influencia de la velocidad de agitación en hidrólisis y fermentación .....	10
1.4.1.3 Influencia del pH en hidrólisis y fermentación .....	10
1.4.1.4 Influencia del CO <sub>2</sub> y O <sub>2</sub> en hidrólisis y fermentación .....	10
1.4.2 Campo magnético de una espira con corriente .....	10
1.4.3 Campo magnético de un electroimán .....	11
1.4.4 Superparamagnetismo .....	12
1.4.5 Fuerza electromagnética.....	12

1.4.6	Norma para el diseño higiénico en la industria alimentaria .....	13
1.5	Estado del arte .....	13
Capítulo 2	.....	17
2.	Metodología. ....	18
2.1	Requerimientos de diseño.....	18
2.2	Generación de ideas .....	19
2.3	Alternativas de solución.....	20
2.4	Diseño conceptual.....	22
2.5	Proceso de diseño.....	24
2.6	Diseño de la estructura.....	25
2.6.1	Recipiente principal .....	25
2.6.2	Carcasa externa .....	26
2.7	Componentes electrónicos principales .....	26
2.7.1	Alimentación eléctrica .....	26
2.7.2	Controlador.....	27
2.8	Diseño del subsistema: Campo magnético .....	27
2.8.1	Materiales de los electroimanes .....	27
2.8.2	Dimensionamiento de electroimanes .....	29
2.8.3	Construcción de electroimanes .....	31
2.8.4	Pruebas experimentales.....	33
2.9	Diseño del subsistema: Temperatura .....	36
2.9.1	Selección de componentes (Temperatura) .....	36
2.9.2	Diseño del control de temperatura .....	37
2.10	Diseño del subsistema: pH.....	39
2.11	Diseño del subsistema: Agitación.....	41
2.11.1	Selección de componentes (Agitación) .....	41
2.11.2	Diseño del control de velocidad.....	42

2.12	Diseño de la interfaz de usuario .....	43
2.13	Otros sensores .....	44
2.14	Aspectos éticos y legales .....	44
Capítulo 3	.....	46
3.	Resultados y análisis .....	47
3.1	Resultados del subsistema campo magnético .....	47
3.2	Resultados del subsistema de temperatura .....	56
3.3	Resultados del subsistema de agitación. ....	58
3.4	Resultados del subsistema de pH. ....	62
3.5	Resultados de la interfaz de usuario .....	64
3.6	Ensamble .....	66
3.7	Análisis de costos.....	67
Capítulo 4	.....	69
4.	Conclusiones y recomendaciones .....	70
4.1	Conclusiones.....	70
4.2	Recomendaciones.....	71
Referencias	.....	72
APÉNDICES	.....	81

## ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
PLA	Poliácido láctico
PETG	Tereftalato de polietileno modificado con glicol
3D	Tres dimensiones
PID	Controlador proporcional-integral-derivativo
GPIO	<i>General purpose input/output</i>
RPM	Revoluciones por minute
PWM	Modulación por ancho de pulso
AWG	Calibre de alambre estadounidense

## SIMBOLOGÍA

g	gramo
kg	Kilogramo
pH	Potencial de hidrógeno
m	Metro
cm	Centímetro
mm	Milímetro
V	Voltio
A	Amperio
P	Constante proporcional
I	Constante integral
D	Constante derivativa
h	Horas
min	Minutos
s	Segundos
HCl	Ácido clorhídrico
NaOH	Hidróxido de sodio

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Tipos de fermentación y productos.....	2
Figura 1.2 Producción de biocombustibles.....	2
Figura 1.3 Enzimas inmovilizadas con nanopartículas magnéticas.....	3
Figura 1.4 <i>Microorganismos inmovilizados con nanopartículas magnéticas de óxido de hierro (ION por sus siglas en inglés)</i> .....	3
Figura 1.5 <i>Recuperación de sistemas inmovilizados con nanopartículas magnéticas</i> ....	5
Figura 1.6 <i>Mercado global de tecnología de fermentación microbiana</i> .....	6
Figura 1.7 <i>Mercado global de enzimas industriales</i> .....	7
Figura 1.8 <i>Hidrólisis enzimática (simplificación de macromoléculas)</i> .....	9
Figura 1.9 <i>Fermentación</i> .....	9
Figura 1.10 Intensificación del campo magnético por inclusión del núcleo ferroso .....	12
Figura 1.11 Biorreactor .....	14
Figura 1.12 Experimento manual con nanopartículas magnéticas .....	14
Figura 1.13 Nanopartículas magnéticas en la salud.....	15
Figura 1.14 Sistema MagNERD .....	15
Figura 1.15 Prototipo MagNERD .....	16
Figura 2.1 Diagrama de funcionalidad.....	19
Figura 2.2 Matriz impacto vs dificultad .....	20
Figura 2.3 Boceto de alternativa de solución 1 .....	20
Figura 2.4 Boceto de alternativa de solución 2.....	21
Figura 2.5 Boceto de alternativa de solución 3.....	21
Figura 2.6 Boceto de alternativa de solución 4.....	22
Figura 2.7 Metodología de diseño .....	24
Figura 2.8 <i>Recipiente marca Umco</i> .....	25
Figura 2.9 Fuente de poder .....	26
Figura 2.10 <i>ESP-32S</i> .....	27
Figura 2.11 <i>Carrete AWG 20</i> .....	28
Figura 2.12 <i>Plancha ASTM A36</i> .....	28
Figura 2.13 Parámetros de los arreglos de bobinas a compararse. ....	29
Figura 2.14 Gráfico referencial para el análisis del campo magnético en el eje .....	30
Figura 2.15 Gráfico referencial para la distribución del campo magnético en el plano XY .....	30

Figura 2.16 Núcleo construido.....	31
Figura 2.17 Carrete armado .....	32
Figura 2.18 Carrete desenroscado .....	32
Figura 2.19 Embobinado realizado en carrete.....	32
Figura 2.20 Embobinado colocado alrededor del núcleo.....	33
Figura 2.21 Preparación de medios para pruebas.....	33
Figura 2.22 Preparación para pruebas de sedimentación .....	34
Figura 2.23 <i>Preparación para pruebas de descarga por gravedad</i> .....	34
Figura 2.24 <i>Preparación para pruebas de descarga por bomba</i> .....	35
Figura 2.25 Sensor ultrasónico.....	35
Figura 2.26 <i>DS18B20</i> .....	36
Figura 2.27 <i>Resistencia blindada</i> .....	37
Figura 2.28 Configuración del experimento de identificación de planta.....	37
Figura 2.29 Comparación de curvas de planta experimental y teórica .....	38
Figura 2.30 Configuración experimental de prueba del controlador .....	39
Figura 2.31 <i>PH0-14</i> .....	40
Figura 2.32 Calibración de sensor de pH .....	40
Figura 2.33 <i>Motor GA25-370</i> .....	41
Figura 2.34 Circuito de control y fuerza del agitador .....	42
Figura 2.35 Sintonización experimental del PID de agitación.....	42
Figura 2.36 <i>Pantalla Elecrow Wizee-ESP32</i> .....	43
Figura 2.37 Software Squareline Studio .....	43
Figura 2.38 Sensor de CO <sub>2</sub> MG-811.....	44
Figura 2.39 Grove Gas Sensor (O <sub>2</sub> ) .....	44
Figura 3.1 <i>Campo magnético en el eje del electroimán (Arreglo de 2 bobinas)</i> .....	47
Figura 3.2 <i>Campo magnético en el eje del electroimán (Arreglo de 3 bobinas)</i> .....	48
Figura 3.3 <i>Campo magnético en el eje del electroimán (Arreglo de 6 bobinas)</i> .....	49
Figura 3.4 <i>Campo magnético en un plano a 1 cm, 5 cm y 10 cm de altura de un arreglo de 2 bobinas de 6 cm de radio cada una</i> .....	50
Figura 3.5 <i>Campo magnético en un plano a 1 cm, 5 cm y 10 cm de altura de un arreglo de 3 bobinas de 5 cm de radio cada una</i> .....	51
Figura 3.6 <i>Campo magnético en un plano a 1 cm, 5 cm y 10 cm de altura de un arreglo de 3 bobinas de 5 cm de radio cada una</i> .....	52

Figura 3.7 <i>Arreglo de electroimanes construido con ventiladores, soportes y canal de ventilación</i> .....	53
Figura 3.8 <i>Comparación de decantación de partículas de hierro por gravedad y en presencia del campo magnético</i> .....	54
Figura 3.9 <i>Partículas retenidas durante la descarga del líquido por una llave inferior</i> ...	54
Figura 3.10 <i>Partículas removidas durante la descarga sin la presencia de campo magnético</i> .....	55
Figura 3.11 <i>Respuesta del controlador simulado</i> .....	56
Figura 3.12 <i>Control experimental del subsistema de temperatura con referencia de 50°C</i> .....	57
Figura 3.13 <i>Control experimental del subsistema de temperatura con referencia de 35°C</i> .....	58
Figura 3.14 <i>Agitador Rushton impreso en PETG</i> .....	58
Figura 3.15 <i>Pruebas experimentales de agitación con referencia de 100rpm</i> .....	59
Figura 3.16 <i>Pruebas experimentales de agitación con referencia de 50rpm</i> .....	60
Figura 3.17 <i>Pruebas experimentales de agitación con referencia de 25rpm</i> .....	61
Figura 3.18 <i>Mecanismo de goteo de soluciones reguladoras de pH</i> .....	62
Figura 3.19 <i>Prueba experimental regulando el pH dentro del rango de 4.5 a 5.5</i> .....	63
Figura 3.20 <i>Prueba experimental regulando el pH dentro del rango de 7 a 8</i> .....	63
Figura 3.21 <i>Pantalla principal</i> .....	64
Figura 3.22 <i>Pantalla de gráfica de agitación</i> .....	65
Figura 3.23 <i>Pantalla de gráfica de temperatura</i> .....	65
Figura 3.24 <i>Pantalla de gráfica de pH</i> .....	66
Figura 3.25 <i>Ensamble completo del dispositivo. Vista frontal y posterior</i> .....	66
Figura 3.26 <i>Diagrama esquemático del circuito general del dispositivo</i> .....	67

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Ejemplos de rangos de temperatura en fermentación .....	10
Tabla 2.1 Requerimientos de diseño .....	18
Tabla 2.2 Ponderación de criterios de selección .....	23
Tabla 2.3 Matriz de decisión .....	23
Tabla 2.4 Características recipiente principal .....	25
Tabla 2.5 Características del controlador ESP-32S .....	27
Tabla 2.6 Características alambre AWG 20 .....	28
Tabla 2.7 Características ASTM A36 .....	28
Tabla 2.8 Especificaciones sensor DS18B20 marca GAOHOU .....	36
Tabla 2.9 Especificaciones resistencia blindada .....	37
Tabla 2.10 Especificaciones sensor PH0-14 BU0481 marca GAOHOU .....	40
Tabla 2.11 Especificaciones motor GA25-370.....	41
Tabla 2.12 Especificaciones pantalla táctil Elecrow Wizee-ESP32 WZ4827R043 .....	43
Tabla 3.1 Descripción de rubros.....	68

## ÍNDICE DE PLANOS

- PLANO 1 Biomag 1 (lista de partes)
- PLANO 2 Leva estranguladora
- PLANO 3 Soporte de servomotor
- PLANO 4 Cremallera/camisa del motor
- PLANO 5 Piñón
- PLANO 6 Guarda (Piñón-cremallera)
- PLANO 7 Guarda (mini-motor)
- PLANO 8 Eje del agitador
- PLANO 9 Acoplador eje-motor

# Capítulo 1

## 1. INTRODUCCIÓN

La hidrólisis y fermentación son procesos bioquímicos ampliamente utilizados en la industria alimentaria. Estos se encuentran presentes en la creación de productos comerciales como cerveza, yogurt, vino, vinagre, jaleas, etc. [1]. También se emplean en la producción de biocombustibles, los cuales constituyen fuentes de energía renovables, provenientes de biomasa y residuos orgánicos [2].

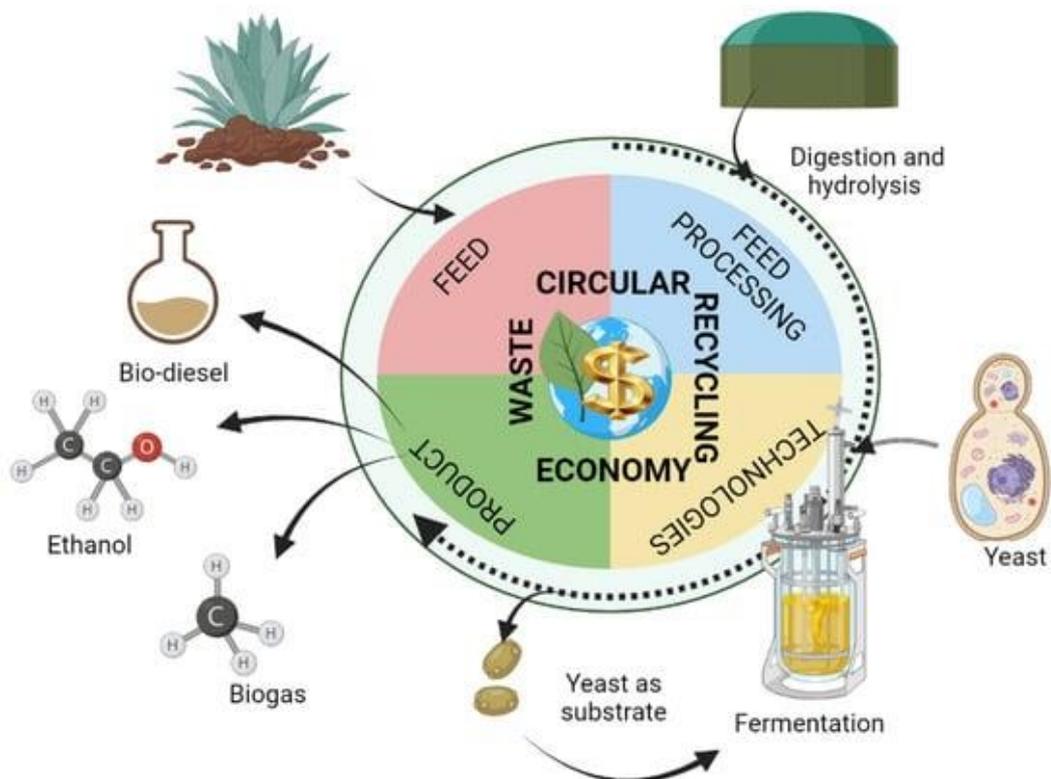
**Figura 1.1**

*Tipos de fermentación y productos [3]*



**Figura 1.2**

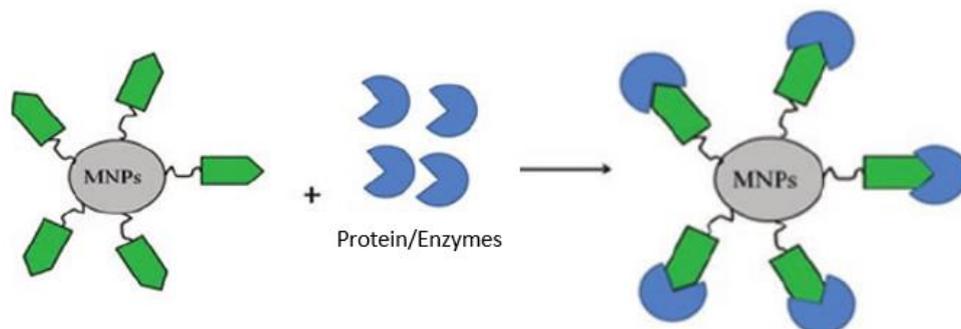
*Producción de biocombustibles [4]*



La hidrólisis y fermentación son llevados a cabo por la acción de enzimas y microorganismos, respectivamente. En la mayoría de casos, estos componentes añadidos representan altos costos y no son deseables en el producto final. No obstante, los métodos convencionales para la recuperación de estos compuestos son complicados y presentan diversas limitaciones [5]. En consecuencia, se presentan nuevas alternativas para manipular con mayor facilidad estos sistemas biológicos (enzimas y microorganismos). Entre estas, se encuentra la inmovilización empleando nanopartículas magnéticas. Este proceso bioquímico permite la unión de las nanopartículas y los sistemas biológicos de manera que, al finalizar los procesos de hidrólisis o fermentación, sea posible atraer las enzimas o microorganismos mediante un campo magnético, separándolos del producto [6].

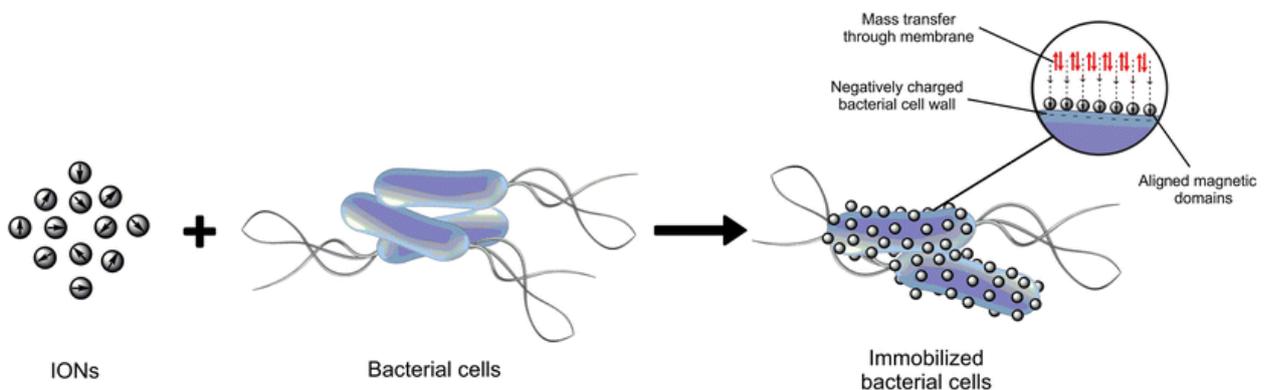
**Figura 1.3**

*Enzimas inmovilizadas con nanopartículas magnéticas [7]*



**Figura 1.4**

*Microorganismos inmovilizados con nanopartículas magnéticas de óxido de hierro (ION por sus siglas en inglés) [8]*



La innovación a través de estas propuestas tecnológicas puede brindar múltiples beneficios a la industria alimentaria, generando ahorros económicos al permitir la reutilización de recursos. Para esto, resulta imprescindible impulsar la investigación en esta área, de manera que se pueda verificar y perfeccionar la eficacia de estas técnicas [9]. Por esto, este proyecto propone el diseño de un dispositivo de laboratorio que permita realizar pruebas controladas de los procesos biotecnológicos en cuestión (hidrólisis y fermentación).

El equipo permitirá medir, visualizar y registrar las variables relevantes para la evaluación de estos procesos. Además, automatizará la separación de sistemas inmovilizados para su reúso, y el control de las condiciones de trabajo parametrizadas por el usuario. De esta forma, se brinda una herramienta a los investigadores de las áreas de ingeniería en alimentos, biología y química, para realizar aportes importantes de aplicaciones biotecnológicas en la industria alimentaria.

### **1.1 Descripción del problema**

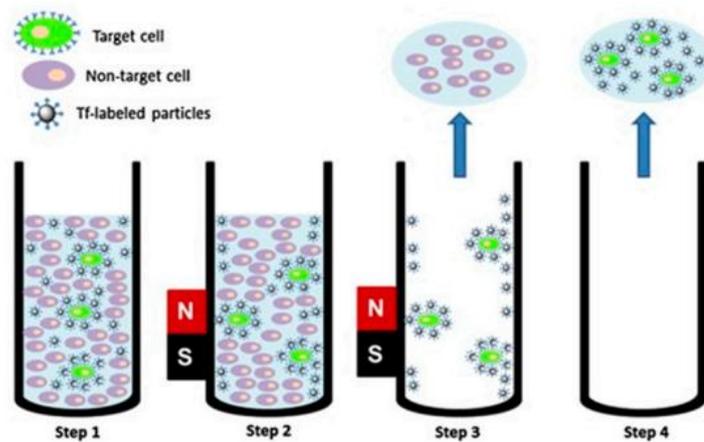
El tratamiento de los productos obtenidos de los procesos de hidrólisis y fermentación para inactivar o extraer las enzimas y microorganismos añadidos resulta costoso y laborioso. Tradicionalmente, los métodos más empleados para la desnaturalización de enzimas son: aplicación de calor, cambios de pH, y adición de sustancias químicas. Estas etapas adicionales, además de implicar un mayor costo y tiempo de producción, no permiten la recuperación de las enzimas. En consecuencia, se requiere una nueva inversión en cada ciclo del proceso [10]. Por otro lado, el proceso de fermentación requiere la preparación previa del inóculo, el cual consiste en el conjunto de microorganismos que se introduce en el medio para ejecutar dicho proceso. Estas bacterias u hongos se reproducen durante la fermentación, por lo que se requiere una clarificación posterior para extraerlos del producto. No obstante, esto implica la contaminación de los microorganismos, lo cual dificulta su reúso. En consecuencia, se requiere preparar un nuevo inóculo en cada lote de fermentación, aumentando el tiempo de producción y costo de materia prima [11].

Para facilitar la recuperación de estos sistemas biológicos, se han desarrollado estrategias como la inmovilización con nanopartículas magnéticas. Al unir las enzimas o microorganismos a estas nanopartículas, es posible separarlas de la sustancia líquida mediante la aplicación de un campo magnético que las atraiga. De esta forma, se

prescinde de procesos adicionales. El reducido tamaño de estas partículas ocasiona un comportamiento súper-paramagnético, es decir, que no presentan histéresis. Gracias a esto, pueden ser liberadas nuevamente, una vez desactivado el campo magnético externo, permitiendo su reúso en la siguiente iteración del proceso [9].

### Figura 1.5

*Recuperación de sistemas inmobilizados con nanopartículas magnéticas [9]*



El Laboratorio de Bioprocesos de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, realiza investigaciones afines a esta temática. No obstante, los experimentos de hidrólisis y fermentaciones se desarrollan con mediciones y ajustes de variables de proceso de manera manual. En consecuencia, no es posible llevar un registro continuo del estado del proceso. Debido a esto, se requiere el diseño de un sistema capaz de monitorear y controlar las condiciones de trabajo como temperatura, pH, y velocidad de agitación, así como registrar la concentración de  $\text{CO}_2$  y  $\text{O}_2$  durante el proceso.

El equipo debe generar un campo magnético capaz de captar las nanopartículas magnéticas junto a los sistemas biológicos inmobilizados. De esta forma, se pueden realizar estudios controlados del desempeño de las enzimas o microorganismos reutilizados luego de varias iteraciones. Cada sistema biológico posee comportamientos diferentes, por lo tanto, la aplicación de estas alternativas biotecnológicas debe ser estudiada independientemente para cada producto alimenticio.

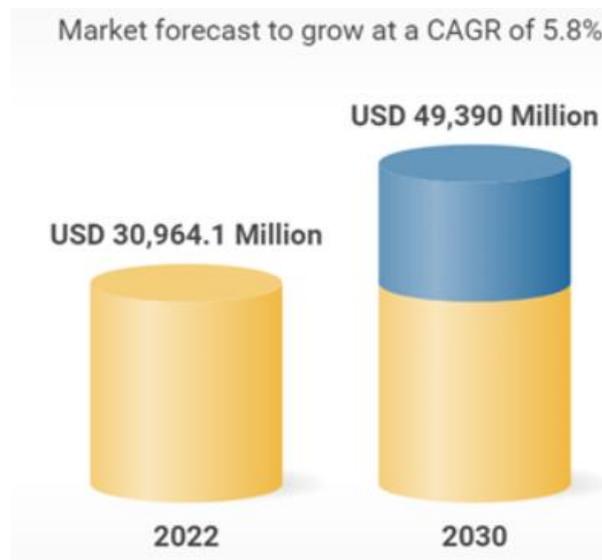
El diseño propuesto corresponde a una herramienta para la adquisición de los datos necesarios para determinar parámetros importantes como: la relación entre la eficiencia y la cantidad de ciclos de reúso, las variables de acondicionamiento ideales, la calidad del producto final, etc. [6].

## 1.2 Justificación del problema

La fermentación en alimentos es un proceso metabólico del cual existe evidencia histórica desde el año 7000 A.C. Aproximadamente un tercio de la dieta humana se basa en alimentos y bebidas fermentadas, incluyendo lácteos, cereales, bebidas alcohólicas, entre otros. Se estima que existen más de 5000 tipos de alimentos que requieren este procedimiento en todo el mundo [12]. En 2023 el mercado de tecnología microbiana para fermentación fue valorado en casi \$31000 millones. Se proyecta que en el año 2030 este alcance más de \$49000 millones [13]. Cada ciclo de fermentación requiere la introducción de nuevos microorganismos que consuman los azúcares presentes. Para esto, se requiere la preparación del inóculo, la cual se realiza en laboratorio, asegurando las condiciones adecuadas para un óptimo desempeño [14]. Actualmente, las industrias intentan disminuir la duración de este proceso. Por ejemplo, en la producción de biocombustibles, se han realizado investigaciones para reducir este tiempo de preparación de 48 a 36 horas, logrando así atenuar los costos del producto final [15].

### Figura 1.6

*Mercado global de tecnología de fermentación microbiana [13]*

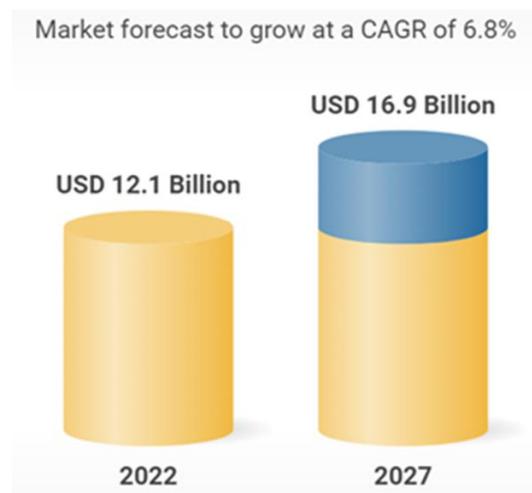


De manera similar, las enzimas también representan un componente importante en este contexto. En la actualidad, estas participan en más de 700 productos comerciales, de los cuales el 93% corresponde a alimentos [16]. El mercado global de enzimas fue valorado en \$12100 millones en 2022. Su constante innovación y demanda permiten estimar un crecimiento hasta \$16900 millones en el año 2027 [17]. En la industria de biocombustibles, el alto costo de las enzimas es uno de los principales factores que

afectan la rentabilidad de estas alternativas energéticas. El costo de las enzimas para uso industrial es aproximadamente \$1000/kg [18]. Según el tipo de proceso, estas representan entre el 10 y el 49% del costo de producción total [19]. Por ejemplo, este porcentaje varía del 30 al 40% en la elaboración de bioetanol a partir de enzimas celulasa [20].

### Figura 1.7

*Mercado global de enzimas industriales [17]*



El uso de microorganismos y enzimas presenta múltiples beneficios en la producción de alimentos. Con el objetivo de permitir su reuso, se emplean distintas estrategias para la extracción de estos componentes del producto final. No obstante, esta recuperación es laboriosa y puede representar desde el 15% hasta el 70% del costo de producción [21]. Para enfrentar esta problemática se inmovilizan estos sistemas biológicos utilizando nanopartículas magnéticas. Esto permite facilitar la manipulación, recuperación y reuso de las enzimas y microorganismos. Además, la inmovilización otorga beneficios como una mayor estabilidad del proceso. Las nanopartículas magnéticas son ideales debido a su compatibilidad ya que, al poseer una superficie relativamente amplia, pueden enlazarse a varias enzimas simultáneamente [22]. Esta estrategia se encuentra aún en etapa de investigación. Sin embargo, se estima que la extracción y reutilización de estos sistemas inmovilizados mediante campos magnéticos podría generar ahorros de hasta el 60% [23]. Debido a esto, la comunidad científica ha manifestado un gran interés en estos métodos no convencionales. Entre 2016 y 2021 se publicaron 523 artículos estudiando la aplicación de las nanopartículas magnéticas en procesos biotecnológicos [24]. En consecuencia, resulta imprescindible apoyar el

desarrollo biotecnológico aportando herramientas que permitan automatizar los procesos de estudio para un monitoreo, control y registro mucho más preciso y confiable.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo general**

Diseñar un sistema automatizado para el reúso de enzimas y microorganismos en los procesos de hidrólisis y fermentación, mediante la aplicación de campos magnéticos y el monitoreo de variables del proceso.

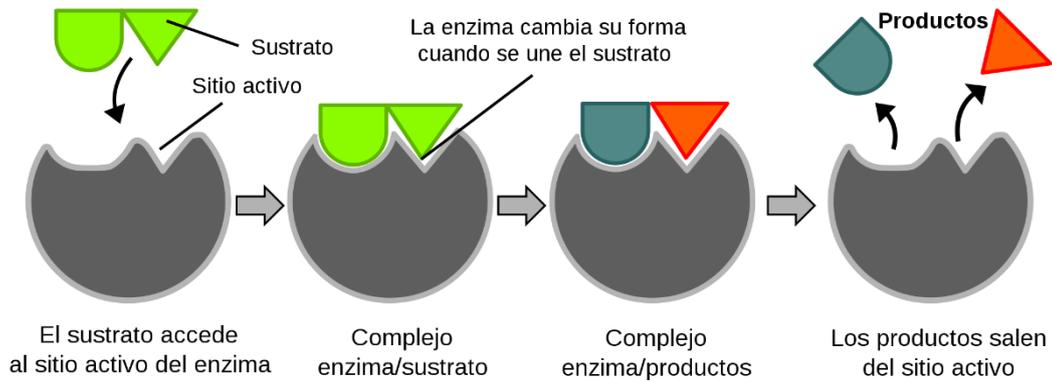
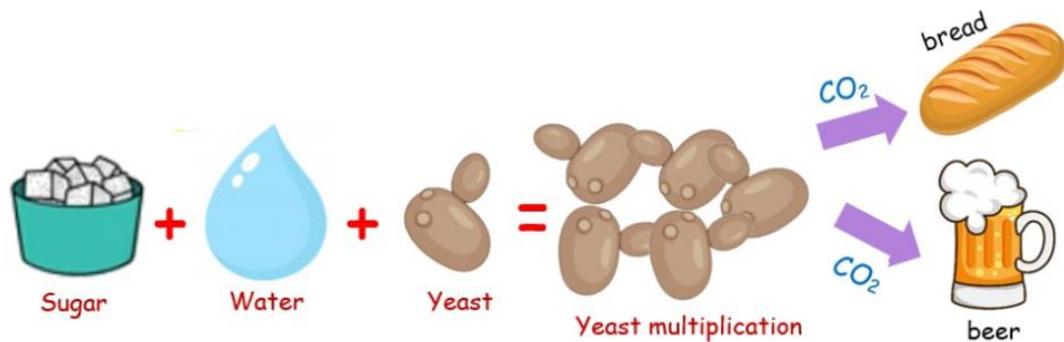
#### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Diseñar un sistema electromagnético para la retención y reúso de enzimas y sistemas biológicos inmovilizados.
- Diseñar un sistema mecatrónico para la automatización de los procesos de hidrólisis y fermentación mediante el acondicionamiento de su temperatura, intensidad de campo magnético, pH y velocidad de agitación.
- Programar una interfaz de usuario para el control y monitoreo del proceso, a través de la configuración y registro de parámetros importantes.

### **1.4 Marco teórico**

#### **1.4.1 Hidrólisis y fermentación**

La fermentación se define como la conversión de carbohidratos en alcohol o ácidos orgánicos, a través de bacterias o levaduras. Estos microorganismos son capaces de procesar una variedad limitada de moléculas, por lo cual, se requiere un pretratamiento para trabajar componentes más complejos [25]. Debido a esto, se realiza un proceso de hidrólisis previo para reducir las moléculas de azúcares. En el caso de la hidrólisis enzimática, se emplean enzimas para degradar los sustratos presentes. Según la sustancia producida, se pueden emplear distintos tipos de enzimas con diferentes condiciones de trabajo. Una vez simplificadas las moléculas de azúcares, estas pueden ser tratadas con mayor facilidad por los microorganismos fermentadores [26].

**Figura 1.8***Hidrólisis enzimática (simplificación de macromoléculas) [27]***Figura 1.9***Fermentación [28]*

#### 1.4.1.1 Influencia de la temperatura en hidrólisis y fermentación

La hidrólisis y fermentación de cada producto posee un rango de temperaturas adecuado para su desempeño. A bajas temperaturas, las reacciones de las enzimas o microorganismos son muy lentas y poco eficientes. Por otro lado, el calor excesivo puede inactivar o destruir estos sistemas biológicos. Generalmente, la temperatura ideal para las enzimas en los procesos de hidrólisis varía entre 45°C y 55°C [29]. Los microorganismos en fermentación trabajan en rangos muy variados según el producto, como se muestra en la Tabla 1.1.

**Tabla 1.1***Ejemplos de rangos de temperatura en fermentación [30]*

<b>Producto</b>	<b>Rango de Temperatura</b>
Cerveza	15 – 30 °C
Vino rojo	24 – 29 °C
Yogurt	45 – 48 °C
Etanol	30 – 37 °C

**1.4.1.2 Influencia de la velocidad de agitación en hidrólisis y fermentación**

La agitación del cultivo permite la disolución del oxígeno en este. Esto es vital para el trabajo y dispersión de los sistemas inmovilizados en el medio. Algunas sustancias como los jugos requieren agitaciones lentas entre 40 y 80rpm [31]. No obstante, en la mayoría de los productos la velocidad de agitación ideal varía de 150 a 300 rpm [32].

**1.4.1.3 Influencia del pH en hidrólisis y fermentación**

El pH es una escala del 0 al 14, basada en la concentración de iones de hidrógeno de una disolución. Los valores inferiores a 7 implican un pH ácido, mientras que magnitudes superiores se definen como alcalinas. Las enzimas y microorganismos presentes en la fermentación trabajan en entornos ligeramente ácidos. El rango óptimo varía desde un pH 4.0 a 6.0 [33]. Una técnica para ajustar los niveles de pH es la adición controlada de una solución ácida de HCl o alcalina de NaOH, según se requiera [34].

**1.4.1.4 Influencia del CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> en hidrólisis y fermentación**

La medición de estos componentes brinda información sobre el crecimiento celular y los productos obtenidos durante la fermentación. Por ejemplo, el CO<sub>2</sub> refleja la producción de etanol, al existir una relación directa entre ambas variables [35].

**1.4.2 Campo magnético de una espira con corriente**

Es posible expresar el campo magnético producido por una espira con corriente  $I$  de radio  $a$  en un punto  $(x, y, z)$  de la siguiente manera :

$$B_x = \frac{Cxz}{2\alpha^2\beta\rho^2} [(a^2 + r^2)E(q^2) - \alpha^2K(q^2)] \quad (1.1.1)$$

$$B_y = \frac{y}{x} B_x \quad (1.1.2)$$

$$B_z = \frac{C}{2\alpha^2\beta} [(a^2 - r^2)E(q^2) + \alpha^2K(q^2)] \quad (1.1.3)$$

Las siguientes equivalencias permiten reescribir todo en términos de  $I$ ,  $x$ ,  $y$ ,  $z$  y  $a$ .

$$\rho^2 \equiv x^2 + y^2$$

$$r^2 \equiv x^2 + y^2 + z^2$$

$$\alpha^2 \equiv a^2 + r^2 - 2a\rho$$

$$\beta^2 \equiv a^2 + r^2 + 2a\rho$$

$$\gamma \equiv x^2 - y^2$$

$$C \equiv \mu_0 I / \pi$$

Donde  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  es la permeabilidad magnética del vacío.  $K(q^2)$  y  $E(q^2)$  son integrales elípticas completas de primera y segunda especie [36], respectivamente, evaluadas en  $q^2 = 1 - \alpha^2/\beta^2$  y se definen como sigue:

$$K(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta}} \quad (1.2.1)$$

$$E(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta} d\theta \quad (1.2.2)$$

Existen métodos computacionales para evaluarlas numéricamente [36].

### 1.4.3 Campo magnético de un electroimán

El electroimán se conforma por una bobina que posee un núcleo de material ferromagnético. Mientras la bobina se encuentra encendida, el núcleo se comporta temporalmente como un imán permanente [37]. La intensidad de magnetización ( $M$ ) generada se puede hallar en función de la susceptibilidad magnética del material del núcleo ( $\chi_m$ ) y la intensidad de campo magnético externa ( $H$ ), producida por la bobina.

$$M = \chi_m H \quad (1.3)$$

Esta magnitud puede representarse en función del momento dipolar magnético ( $m$ ) producido en el núcleo, y del volumen ( $V$ ) del mismo.

$$M = \frac{m}{V} \quad (1.4)$$

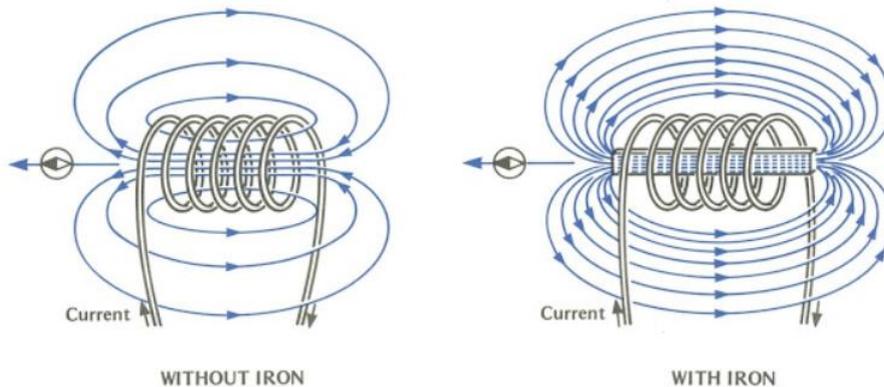
El comportamiento del núcleo magnetizado puede asimilarse al de la bobina. Por lo tanto, se presenta la equivalencia entre la expresión para calcular el campo magnético en un punto sobre el eje de la bobina de N vueltas, e imán, respectivamente, a una distancia z de la superficie.

$$B_z = \frac{\mu_0 N I A}{2\pi z^3} = \frac{\mu_0 m}{2\pi z^3} \quad (1.5)$$

El campo magnético total producido por el conjunto del electroimán corresponderá a la superposición de las contribuciones del solenoide y del núcleo magnetizado [38].

**Figura 1.10**

*Intensificación del campo magnético por inclusión del núcleo ferroso [39]*



#### 1.4.4 Superparamagnetismo

El superparamagnetismo es un comportamiento presente en nanopartículas ferromagnéticas tan pequeñas que poseen un único dominio magnético. Para ello, deben tener un diámetro máximo que ronda entre los 3 nm y los 50 nm, dependiendo del material [40]. Las partículas superparamagnéticas son magnetizadas en presencia de un campo magnético externo, pero no conservan su magnetización después de que el campo desaparece [41]. Es similar al paramagnetismo, pero la susceptibilidad de un material superparamagnético es mucho más alta [40]

#### 1.4.5 Fuerza electromagnética

La fuerza que un campo magnético ejerce sobre un cuerpo magnetizado está dada por la siguiente ecuación:

$$F = v(M \cdot \nabla B) \quad (1.6)$$

Donde  $v$  es el volumen del cuerpo magnetizado,  $M$  es su magnetización y  $\nabla B$  es el gradiente de campo magnético [42]. Las bobinas en los actuadores electromagnéticos son utilizadas para generar un campo magnético que pueda mover el objeto a controlar en una ruta planeada. Ya que  $v$  y  $M$  normalmente se consideran constantes, el diseño de estos sistemas suele enfocarse en el gradiente de campo magnético  $\nabla B$  [42].

#### **1.4.6 Norma para el diseño higiénico en la industria alimentaria**

Según el Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 131, el diseño de equipos para procesamiento de alimentos debe cumplir con las especificaciones de la norma UNE EN 1672-2 [43]. En esta destacan las siguientes consideraciones:

- Los materiales deben ser duraderos, lavables y capaces de desinfectarse. No agrietarse, ni astillarse.
- Los materiales en contacto con los alimentos deben ser resistentes a la corrosión, no tóxicos, no absorbentes, y no transferir colores u olores.
- Las juntas deben ser selladas e higiénicas.
- Los rodamientos y ejes deben ser auto-lubricados o utilizar lubricante de grado alimenticio.
- El líquido debe poder drenarse o retirarse en su totalidad durante la limpieza. Se deben evitar esquinas agudas, radios pequeños, o cavidades poco accesibles [44].

#### **1.5 Estado del arte**

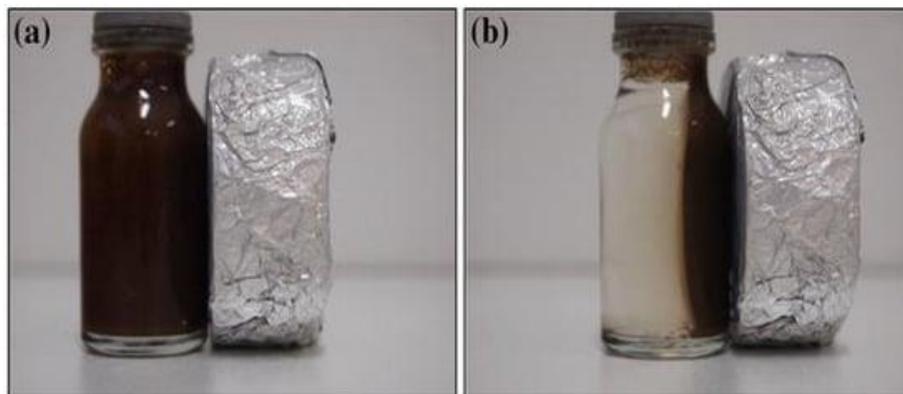
Actualmente, los laboratorios de tecnología en alimentos cuentan con tanques fermentadores o biorreactores para llevar a cabo experimentos de hidrólisis y fermentación. Estos se ofrecen en distintas modalidades con capacidad desde 1L a miles de litros, y en materiales de vidrio o acero inoxidable. Algunos permiten el flujo constante de materia, mientras que otros requieren el ingreso de todos los componentes antes de iniciar el proceso y solo permiten la descarga al finalizarlo. Su tapa posee boquillas que permiten el ingreso de sensores para monitorear y controlar las variables involucradas, propiciando un ambiente apropiado para el proceso biotecnológico [45].

**Figura 1.11**  
*Biorreactor [45]*



No obstante, estos dispositivos no cuentan con un sistema para la recuperación de los sistemas inmovilizados mediante campos magnéticos. Debido a esto, las investigaciones referentes a esta tecnología se han realizado de forma manual, utilizando envases de vidrio e imanes para atraer enzimas inmovilizadas con nanopartículas magnéticas [46].

**Figura 1.12**  
*Experimento manual con nanopartículas magnéticas [46]*

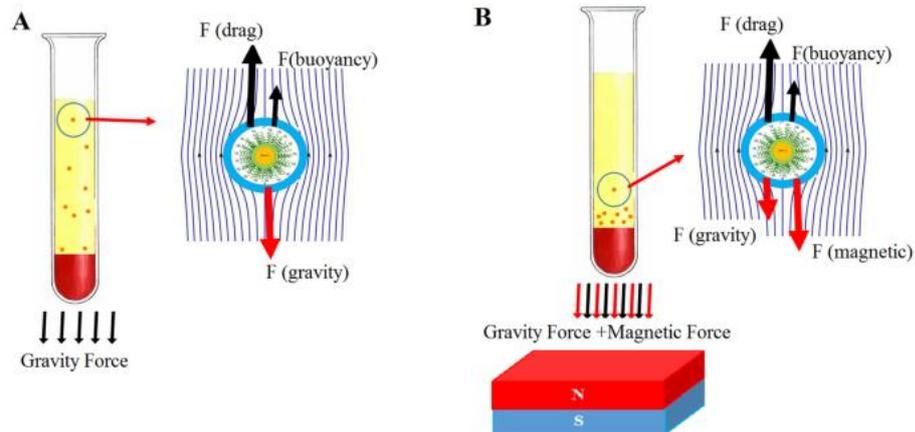


La escasez de equipos automatizados para estos estudios se extiende a otros campos de aplicación, como en ensayos para distribuir medicamentos en la sangre

empleando nanopartículas magnéticas. Experimentos para validar esta tecnología se han desarrollado empleando tubos de ensayo e imanes permanentes de neodimio de 0.1T a 0.3T, y una bobina de 0.5T. No obstante, solo fue posible generar este magnetismo a una distancia máxima de 10mm [47].

**Figura 1.13**

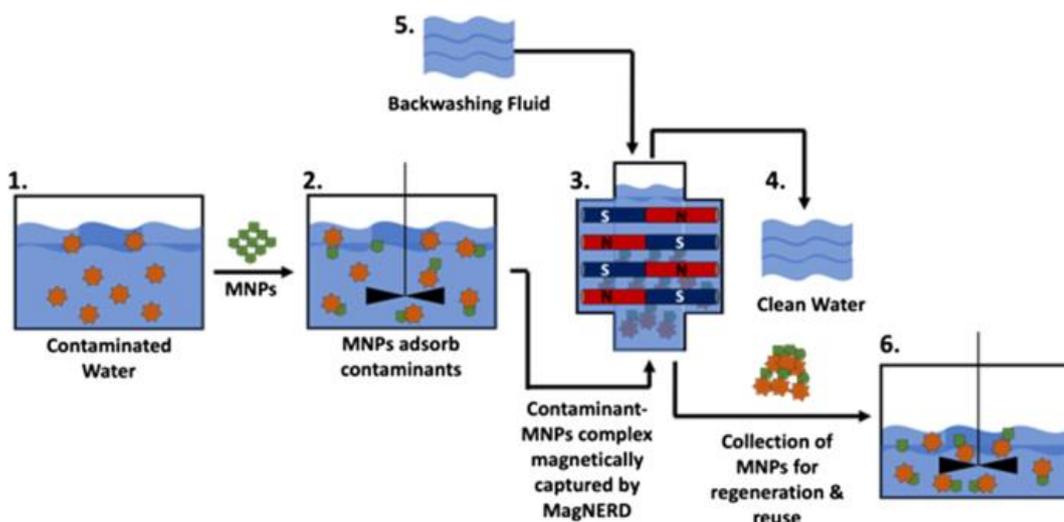
*Nanopartículas magnéticas en la salud* [47]

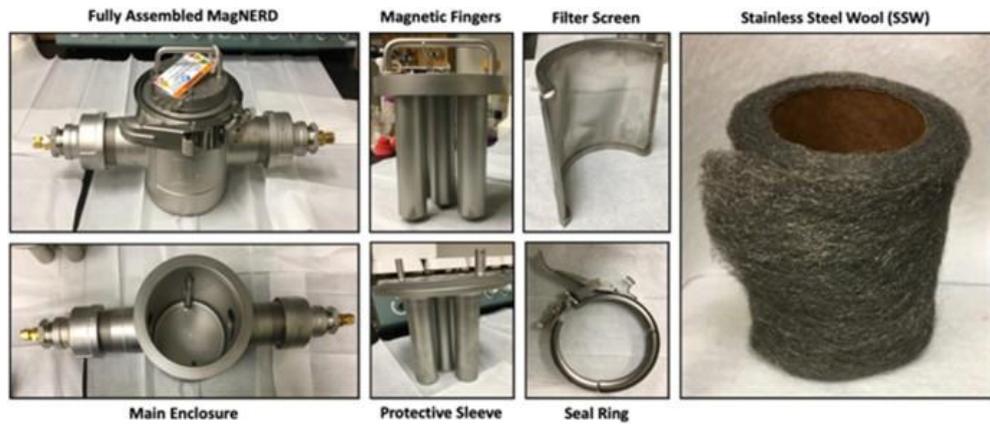


Por otro lado, se han desarrollado prototipos para aplicar esta tecnología en el tratamiento de agua. El sistema MagNERD consiste en un recipiente de 1.11L que contiene 5 columnas de imanes de neodimio. Las nanopartículas magnéticas ingresan al agua para captar impurezas, luego, fluyen a través del equipo MagNERD, donde son atrapadas, permitiendo la salida de agua con menores impurezas [48].

**Figura 1.14**

*Sistema MagNERD* [48]



**Figura 1.15***Prototipo MagNERD [48]*

## **Capítulo 2**

## 2. METODOLOGÍA.

En el presente capítulo se describe el proceso realizado para elaborar el diseño conceptual de la solución a la problemática propuesta. Para esto, se inicia definiendo los requerimientos de diseño que debe cumplir el sistema final. Luego, se plantean distintas alternativas para satisfacer estas necesidades. En base a estrategias de comparación y criterios de selección, se escoge el sistema final más viable.

### 2.1 Requerimientos de diseño

Se registran las características y lineamientos que debe cumplir el sistema diseñado. Estas pueden ser propuestas por el cliente (C) o el diseñador (D). Adicionalmente se clasifican como requerimiento (R) cuando su cumplimiento es indispensable para la validez del equipo, o como deseo (D) cuando se trata de una cualidad adicional o valor agregado.

**Tabla 2.1**

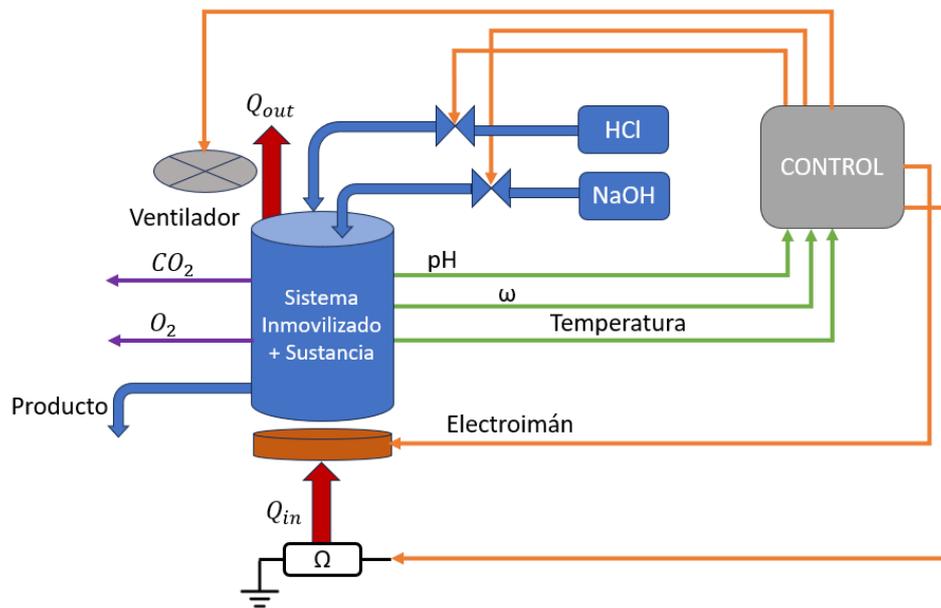
*Requerimientos de diseño*

Concepto	Propone	R/D	Descripción
Función	C	R	Fermentación e hidrólisis controlada, y reúso de sistemas inmovilizados
Dimensión	D	R	Al menos 500mL y máximo 8 litros. Peso menor a 20kg
Movimientos	C	R	Componentes desmontables para poder lavarlos
Materiales	D	R	Materiales resistentes al proceso y aptos para alimentos
Energía	D	R	Fuente DC (campo magnético estático)
Señales y Control	C	R	Control de: velocidad del mezclador, campo magnético, pH y temperatura
	C	R	Medición y registro de CO <sub>2</sub> y O <sub>2</sub>
Aspectos Legales	C/D	R	Normas de seguridad alimenticia

Conociendo las necesidades del cliente, se define un esquema general del equipo a diseñarse en el cual se resume su funcionalidad, indicando las variables medidas y controladas en el sistema.

**Figura 2.1**

*Diagrama de funcionalidad*

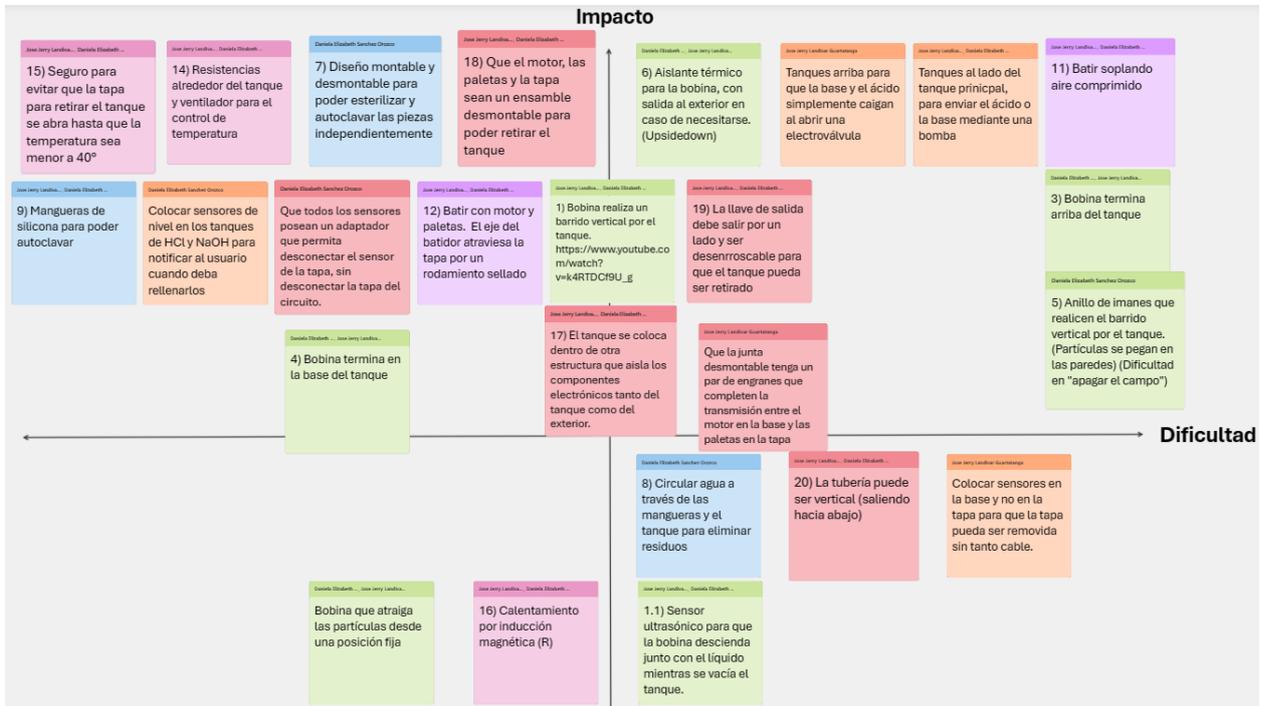


## 2.2 Generación de ideas

Conociendo las diferentes variables involucradas, se dividió el problema en varias categorías mediante un código de color: campo magnético (verde), lavado (azul), mezcla (morado), temperatura (rosado), estructura (rojo), y pH (naranja). Se utilizaron técnicas de generación de ideas para proponer distintas posibles soluciones a cada uno de estos subsistemas. Posteriormente, se evaluó la viabilidad de cada una ubicándolas en una matriz Impacto vs Dificultad. Así, se contrastaron las diferentes ideas entre sí, considerando más convenientes aquellas que impliquen mayores beneficios y sean más sencillas. Por lo tanto, se prefirieron las ideas ubicadas en el segundo cuadrante, junto a algunas del primer cuadrante, a pesar de su nivel de dificultad, debido a su alto impacto.

**Figura 2.2**

*Matriz impacto vs dificultad*

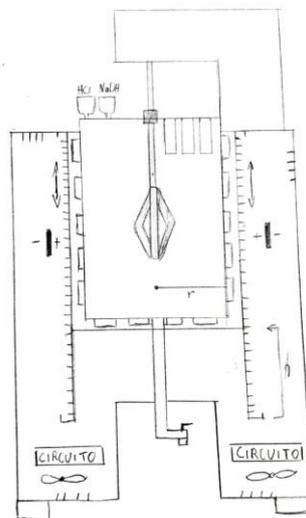


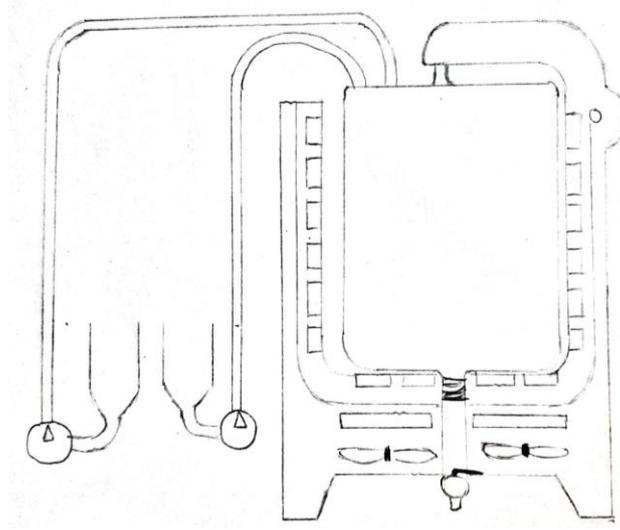
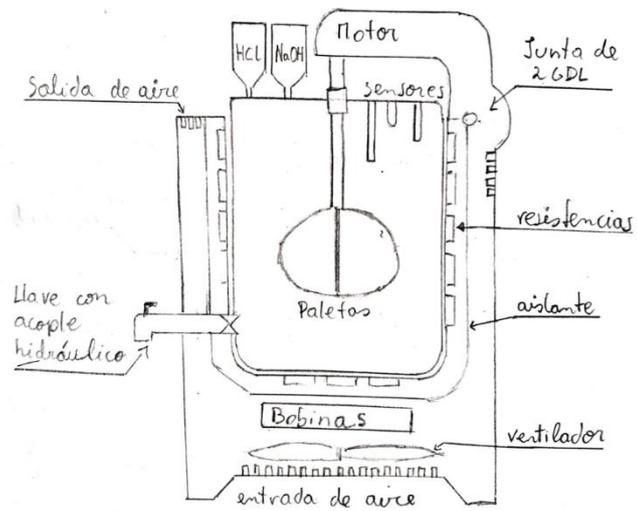
**2.3 Alternativas de solución**

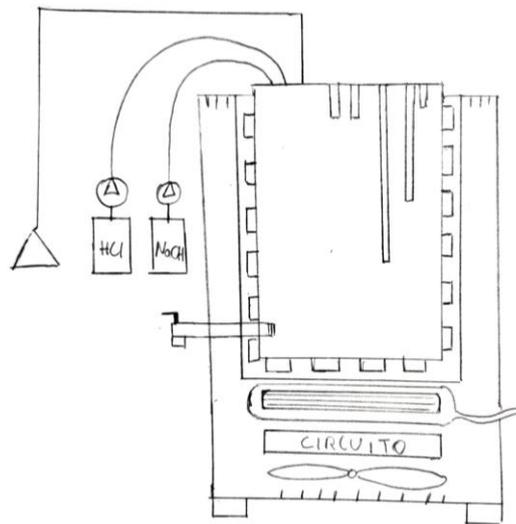
Se evaluó la compatibilidad entre las distintas ideas seleccionadas de cada categoría. En base a esto, se propusieron cuatro bocetos del sistema de manera que cada uno logre cumplir con todos los requerimientos establecidos.

**Figura 2.3**

*Boceto de alternativa de solución 1*



**Figura 2.4***Boceto de alternativa de solución 2***Figura 2.5***Boceto de alternativa de solución 3*

**Figura 2.6***Boceto de alternativa de solución 4*

## 2.4 Diseño conceptual

Para seleccionar la alternativa de solución adecuada, se definen en primer lugar los criterios de selección:

- **Intensidad de campo magnético:** Siendo este el actuador principal del sistema resulta fundamental aumentar la magnitud del campo magnético, con la menor cantidad de recursos posible.
- **Controlabilidad:** Los actuadores propuestos deben controlarse fácilmente, minimizando además las variables externas no controladas.
- **Montable/Desmontable:** Facilidad para desmontar los componentes que deban lavarse y/o esterilizarse.
- **Compacto:** Minimizar el espacio de trabajo.
- **Seguridad:** Reducir los riesgos de daño del equipo o de accidentes a los usuarios.

Se presenta a continuación la ponderación de estos criterios en función de su prioridad.

**Tabla 2.2**

*Ponderación de criterios de selección*

<b>Criterio</b>	<b>Prioridad</b>	<b>Peso Relativo</b>	<b>Porcentaje</b>
Campo magnético	1	4.5	30%
Seguridad	1	4.5	30%
Desmontable	2	3	20%
Controlabilidad	3	2	13.33%
Compacto	4	1	6.66%
<b>Total</b>		15	100%

En base a la información de la Tabla 2.2 se comparan las distintas alternativas de solución. Los puntajes, indicando cuáles de las alternativas favorecen mejor cada criterio, se encuentran resumidos en la siguiente matriz de decisión.

**Tabla 2.3**

*Matriz de decisión*

	<b>Criterio</b>					<b>Resultados</b>	
	Campo Magnético	Seguridad	Desmontable	Controlabilidad	Compacto	Puntaje	Prioridad
Solución 1	0.06	0.105	0.08	0.026	0.006	0.277	<b>2</b>
Solución 2	0.105	0.03	0.06	0.013	0.016	0.224	<b>3</b>
Solución 3	0.105	0.105	0.04	0.053	0.026	0.329	<b>1</b>
Solución 4	0.03	0.02	0.02	0.039	0.016	0.125	<b>4</b>

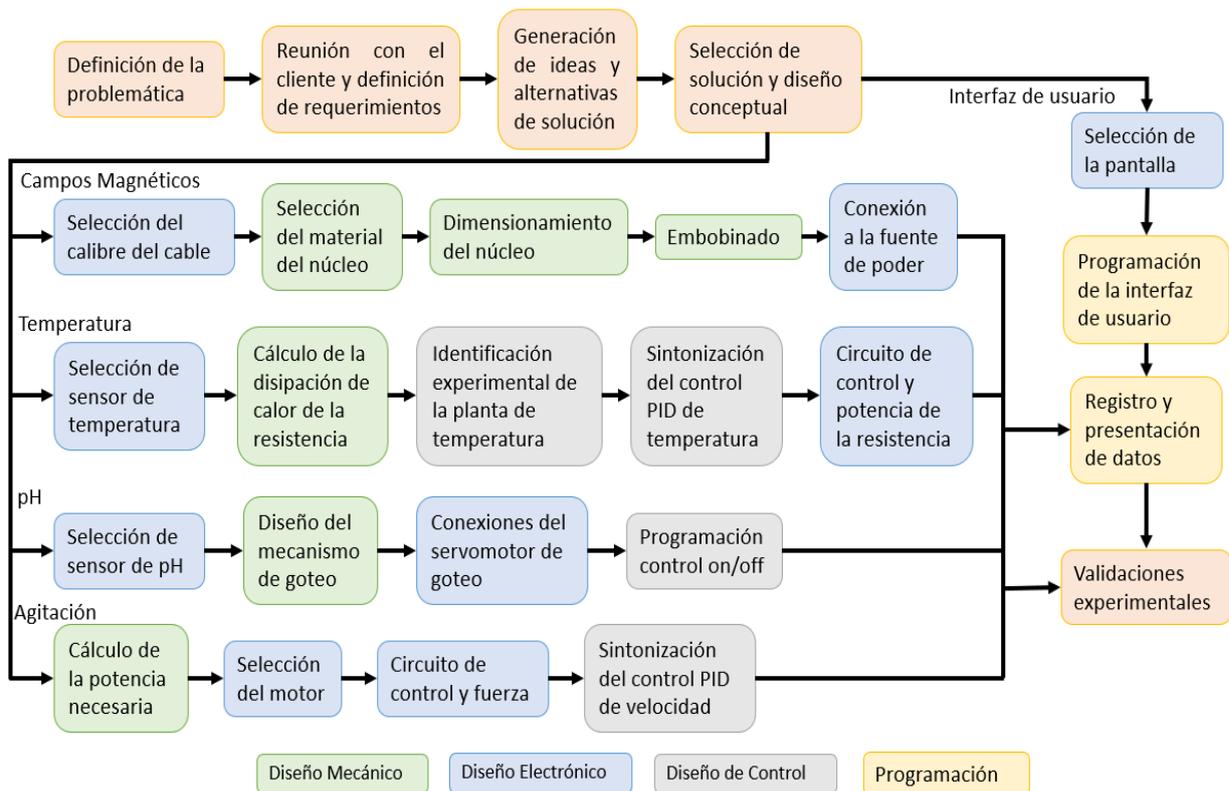
La solución 3 obtuvo el mayor puntaje total, siendo esta la alternativa de mayor prioridad. Por lo tanto, se define este como el diseño conceptual del sistema. En la Figura 2.5 de la sección anterior, se señalan los componentes incluidos en este modelo, para satisfacer todas las funciones del equipo diseñado.

### 2.5 Proceso de diseño

El proyecto presentado se llevó a cabo siguiendo la siguiente metodología de diseño. En esta se detallan los pasos para el diseño mecánico, electrónico y de control de cada subsistema involucrado.

**Figura 2.7**

*Metodología de diseño*



## 2.6 Diseño de la estructura

### 2.6.1 Recipiente principal

Este corresponde al recipiente que alberga el líquido de trabajo. Por ende, debe ser esterilizable. Además, el material debe ser no magnético, para no alterar el comportamiento del campo que atrae las nanopartículas. Debido a esto, se considera que el material ideal es el acero inoxidable 304. No obstante, las ollas de este material por lo general poseen una base de un metal diferente, que sí presenta propiedades ferromagnéticas.

Para evitar la necesidad de manufacturar un recipiente, se decidió utilizar un envase de aluminio apto para bebidas calientes, distribuido localmente. Este metal de grado alimenticio garantiza la resistencia a la corrosión, y permite la limpieza en autoclave. Además, su permeabilidad magnética es casi igual a la del aire [49]. El tamaño de este recipiente se seleccionó en función de la disponibilidad en el mercado local, cumpliendo con el rango de dimensiones especificado por el cliente.

**Tabla 2.4**

*Características recipiente principal [50]*

<b>Figura 2.8</b>	<b>Especificaciones</b>	
<i>Recipiente marca Umco [50]</i>	Diámetro	16 cm
	Altura	20 cm
	Peso	
	Capacidad	3 L

### 2.6.2 Carcasa externa

Se diseñó una estructura para contener todos los componentes electrónicos y mecánicos que conforman el equipo. La base y paredes se construyeron con madera, realizando las perforaciones necesarias para la ventilación del sistema. El motor del agitador se sostiene en una plataforma superior al tanque. En esta se ubican los módulos de los sensores, el microcontrolador, y los recipientes de ácido y base para el control de pH. Esta sección se sostiene mediante tubos de aluminio que se ajustan a la base. Las piezas de mayor detalle como soportes y acoples para sensores se manufacturaron mediante impresión 3D utilizando filamento de polietileno PETG. Este posee una mayor resistencia y flexibilidad que otros plásticos, como el PLA. Trabaja apropiadamente hasta alrededor de los 80°C, por lo que es apto para el rango de temperaturas esperado en este sistema [51].

## 2.7 Componentes electrónicos principales

### 2.7.1 Alimentación eléctrica

La alimentación del sistema electrónico se realizó a través de una fuente de poder conmutada. Se seleccionó el modelo TPS-1230 de la marca EVL, adquirida localmente. Estas fuentes se conectan a la red eléctrica (110V-60Hz) para proporcionar una salida de 12Vdc con una corriente de hasta 30A. Adicionalmente, la fuente utilizada posee un ajuste que permite variar su voltaje de salida entre 5V y 15V [52].

#### Figura 2.9

*Fuente de poder [52]*



Adicionalmente, se requirieron reguladores o reductores de voltaje para energizar los componentes electrónicos que trabajan con una alimentación menor.

## 2.7.2 Controlador

ESP-32S es una tarjeta de desarrollo que utiliza el microcontrolador ESP WROOM 32 el cual cuenta con 2 núcleos de procesamiento y tiene una velocidad de reloj de hasta 240MHz [53]. Se eligió este componente con el fin de asegurar la correcta ejecución de procesos de control simultáneos (que podrían requerir una alta tasa de muestreo) a la vez que se sostiene la comunicación con la interfaz de usuario.

**Tabla 2.5**

*Características del controlador ESP-32S [53]*

Figura 2.10 ESP-32S [53]	Especificaciones	
	Microcontrolador	ESP WROOM 32
	Pines GPIO	Hasta 32
	Entradas análogas	Hasta 16
	Salidas PWM	Hasta 16
	Comunicación	UART, I2C, SPI
	Voltaje I/O	3.3 V

## 2.8 Diseño del subsistema: Campo magnético

### 2.8.1 Materiales de los electroimanes

Como se mostró en el diseño conceptual, se decidió generar el campo magnético mediante un arreglo de electroimanes colocados debajo del recipiente principal.

Para la bobina de los electroimanes se seleccionó un alambre de cobre esmaltado calibre AWG 20, como resultado de los cálculos mostrados en el Apéndice A.

**Tabla 2.6***Características alambre AWG 20 [54]*

<b>Figura 2.11</b> <i>Carrete AWG 20 [54]</i>	<b>Especificaciones</b>	
	Longitud	96.93 m/lb
	Sección transversal	0.813 mm
	Corriente máxima	12 A
	Temperatura máxima	220°C

Se compararon distintos materiales para escoger el material del núcleo del electroimán. El acero ASTM A36 resultó ser el más conveniente debido a su buena permeabilidad magnética, facilidad de manufacturar, y disponibilidad local (Apéndice A).

A continuación se presentan las especificaciones del material adquirido del proveedor DIPAC.

**Tabla 2.7***Características ASTM A36 [55]*

<b>Figura 2.12</b> <i>Plancha ASTM A36 [55]</i>	<b>Especificaciones</b>	
	Permeabilidad magnética relativa	200
	%C	0.25%
	Espesor	2 mm
	Campo magnético de saturación	2.16 T

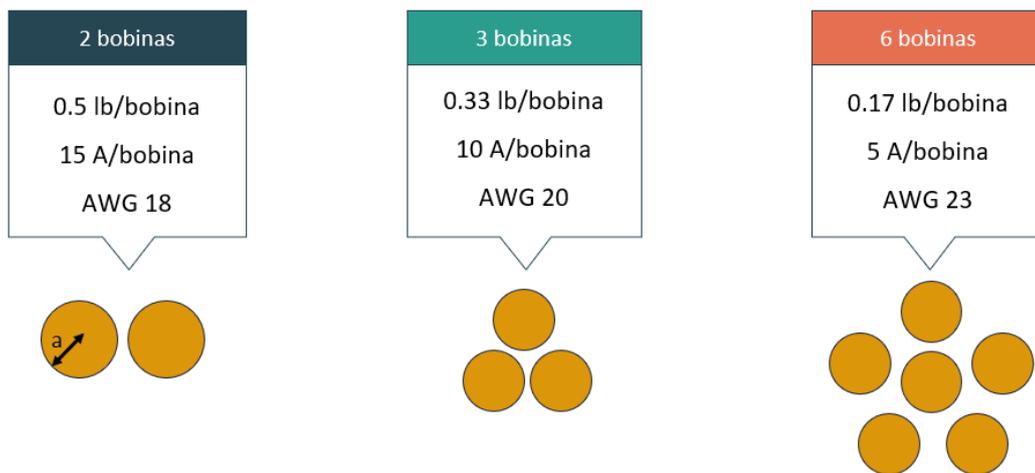
### 2.8.2 Dimensionamiento de electroimanes

Se decidió utilizar una libra de alambre de cobre en total para todas las bobinas construidas, según el calibre seleccionado en el Apéndice A. Esto permite comparar el desempeño de las distintas alternativas manteniendo el mismo costo en material. Además, se consideró que todos los electroimanes se colocarán en paralelo, alimentando este circuito con 12V de la fuente de poder.

Se decidió evaluar el comportamiento del sistema realizando arreglos de 2, 3 y 6 bobinas, de manera que cada conjunto emplee una sola libra de cable. Dentro de cada arreglo, las bobinas se conectan en paralelo. La corriente en cada una corresponde a una fracción del amperaje total de 30A otorgado por la fuente. El siguiente esquema resume la información con que se evaluará cada arreglo.

**Figura 2.13**

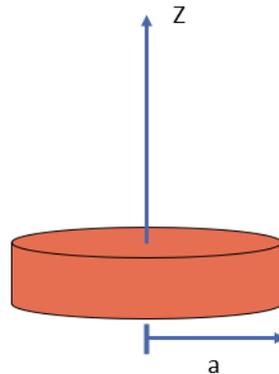
*Parámetros de los arreglos de bobinas a compararse.*



Con estas consideraciones, se evaluó el comportamiento del campo magnético generado en el eje del electroimán (Z), para diferentes radios (a) de bobinas en cada uno de los arreglos.

**Figura 2.14**

*Gráfico referencial para el análisis del campo magnético en el eje*

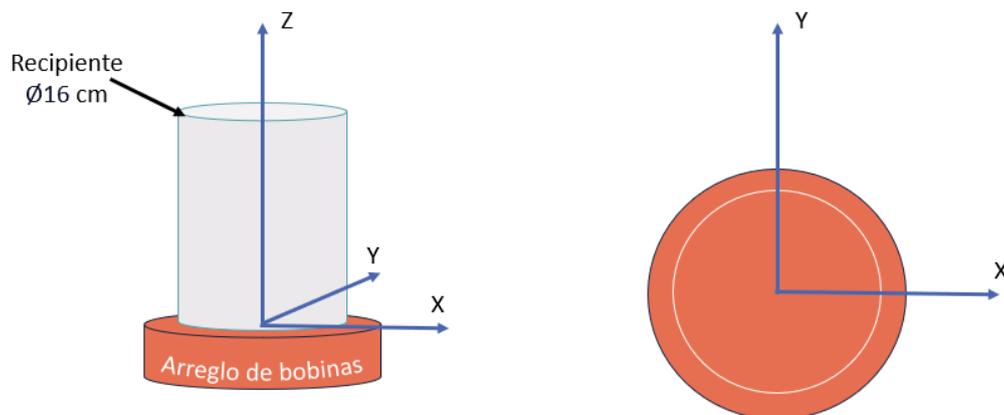


Se codificó un algoritmo en Python para aplicar las ecuaciones descritas en la sección de marco teórico, considerando los parámetros explicados previamente. Las gráficas obtenidas permitieron seleccionar el diámetro más conveniente para cada arreglo de bobinas.

Posteriormente, estos tres arreglos se compararon, al evaluar la superposición de los campos magnéticos generados por todas sus bobinas. De esta forma, fue posible obtener una gráfica que indica la intensidad del campo en diferentes puntos de una superficie (plano XY) ubicada a una altura (Z) específica de la bobina. Finalmente, se seleccionó la configuración (cantidad y diámetro de bobinas) que proporcionó la mejor distribución de campo magnético en el área de trabajo.

**Figura 2.15**

*Gráfico referencial para la distribución del campo magnético en el plano XY*

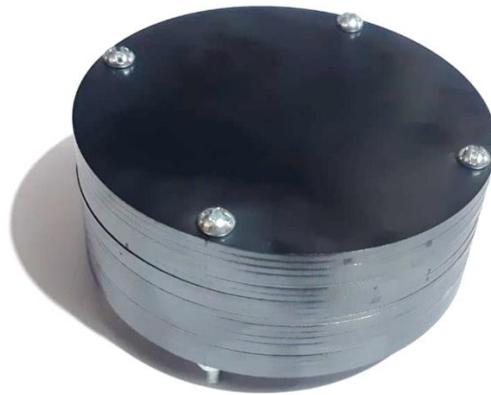


### 2.8.3 Construcción de electroimanes

Una vez decididos el diámetro, número de vueltas y número de bobinas utilizados en el arreglo de electroimanes, se procedió a su construcción. El acero A36 se encuentra con mayor facilidad y a menor costo en su presentación en plancha. Por esto, el diseño propuesto se compuso de discos, cortados por láser. Estos se apilan hasta conseguir la altura deseada según el número de vueltas del embobinado, para posteriormente ajustarse con tornillos.

**Figura 2.16**

*Núcleo construido*



Los cálculos realizados asumen que las vueltas de la bobina se encuentran lo más juntas posibles entre sí y con respecto al núcleo. Dado que el embobinado se realizó de manera manual, esta tarea se complica al aumentar el número de vueltas. Debido a esto, se diseñó e imprimió en PLA un carrete, con un diámetro ligeramente mayor al del núcleo, que permite enrollar el cable a su alrededor. Este carrete posee ranuras para ajustar las vueltas con cinta de aluminio. Además, es desarmable, permitiendo retirar el embobinado para colocarlo posteriormente alrededor del núcleo.

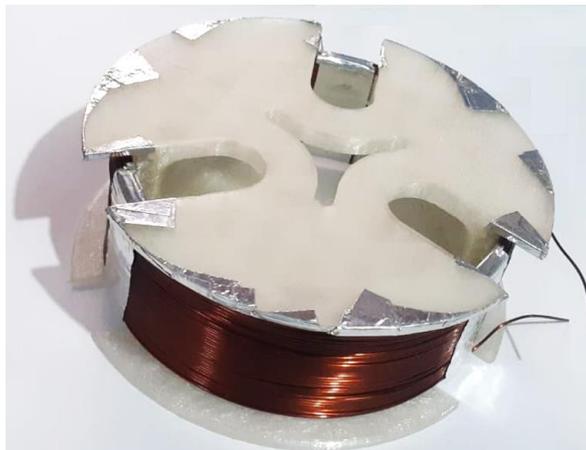
**Figura 2.17**  
*Carrete armado*



**Figura 2.18**  
*Carrete desenroscado*



**Figura 2.19**  
*Embobinado realizado en carrete*



**Figura 2.20**

*Embobinado colocado alrededor del núcleo*

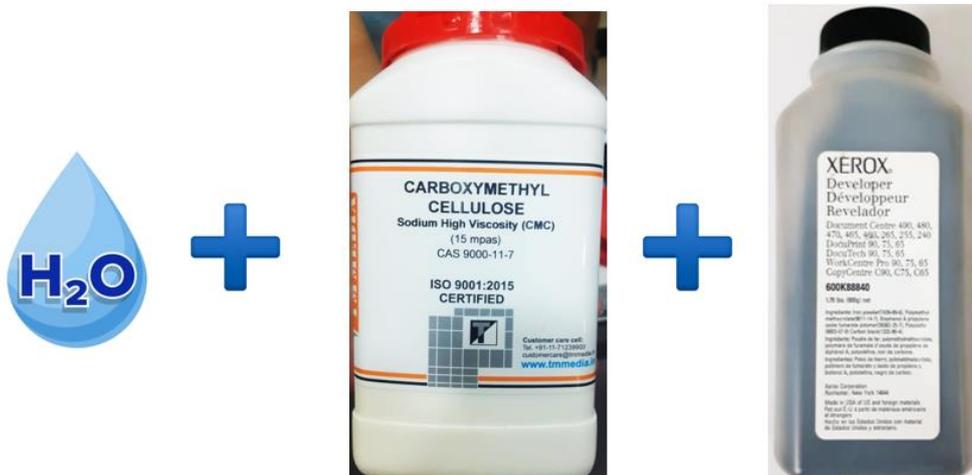


#### **2.8.4 Pruebas experimentales**

Las pruebas experimentales de estas bobinas se realizarán utilizando un componente denominado revelador para simular las nanopartículas magnéticas. Este material consiste en un polvo de material ferroso usado comúnmente en impresoras. Este se ingresará en el líquido de trabajo, el cual consistirá en una mezcla de agua y carboximetilcelulosa. Esta sustancia proporcionada por el cliente genera una viscosidad en el líquido similar a la presentada en los medios de fermentación e hidrólisis. Estos experimentos se realizaron en un recipiente de vidrio para permitir apreciar los efectos ocasionados.

**Figura 2.21**

*Preparación de medios para pruebas*



El primer experimento consistió en comparar la decantación de las partículas con las bobinas apagadas y encendidas. Para esto, se agitó el líquido de trabajo, distribuyendo el revelador en todo su volumen. Luego, se tomaron fotografías cada 10 segundos durante un minuto, en ambos escenarios. Esto permitió observar las diferencias entre la sedimentación por gravedad y en presencia del campo magnético generado por el arreglo de electroimanes ubicado en la base.

### Figura 2.22

*Preparación para pruebas de sedimentación.*



En la segunda prueba se simuló la descarga por gravedad del líquido. Para esto, se elevó y giró el recipiente, para que la llave de salida se ubique en la parte inferior. Adicionalmente, se reubicaron los electroimanes solo por esta prueba para poder visualizar la retención de las partículas en las paredes, mientras el líquido se evacúa.

### Figura 2.23

*Preparación para pruebas de descarga por gravedad.*



Finalmente, se evaluó la posibilidad de extraer el líquido mediante una bomba de 12V. Para esto, se regresó el equipo a su posición definitiva, y se colocó una manguera a una altura de 1.5cm del fondo del recipiente. De esta forma, se comparó la cantidad de partículas de hierro succionadas por la bomba cuando los electroimanes se encuentran encendidos y apagados.

**Figura 2.24**

*Preparación para pruebas de descarga por bomba.*



A esta alternativa se adicionó un sensor de nivel ultrasónico HC-SR04, el cual permite apagar la bomba cuando el producto haya sido descargado.

**Figura 2.25**

*Sensor ultrasónico [56]*



## 2.9 Diseño del subsistema: Temperatura

### 2.9.1 Selección de componentes (Temperatura)

Se escogió el sensor DS18B20 para reconocer la temperatura actual de la sustancia, y retroalimentar esta información al controlador. Este sensor posee una sonda a prueba de agua, que puede limpiarse y esterilizarse con facilidad. Esto permite sumergirlo y medir directamente la temperatura del líquido de trabajo. El sensor digital posee un módulo adaptador de 3 pines, lo cual simplifica su lectura mediante microcontroladores como Arduino o ESP32. Se utilizó un termómetro de mercurio para calibrar la lectura de este sensor.

**Tabla 2.8**

Especificaciones sensor DS18B20 marca GAOHOU [57]

Figura 2.26 DS18B20 [57]	Especificaciones	
	$V_{in}$	3.2 – 5.25 V
	$I_{av}$	2 mA
	Rango de temperatura	-55 – 110°C

Para generar el calor en el sistema se utilizó una resistencia blindada de tipo abrazadera. Esta es de un material metálico y se ajusta alrededor del recipiente. Su característica “blindada” permite transferir el calor mediante conducción térmica, mientras aísla eléctricamente la resistencia y el tanque. La potencia requerida en esta resistencia se calculó en función de las dimensiones del recipiente y el tiempo de calentamiento deseado (Apéndice B). En base a este requerimiento, el fabricante indicó las dimensiones necesarias para la resistencia.

Tabla 2.9

Especificaciones resistencia blindada

Figura 2.27 Resistencia blindada	Especificaciones	
	$V_{in}$	120 Vac
	Potencia	1 kW
	Diámetro	16 cm
	Altura	5 cm
	Espesor	5 mm

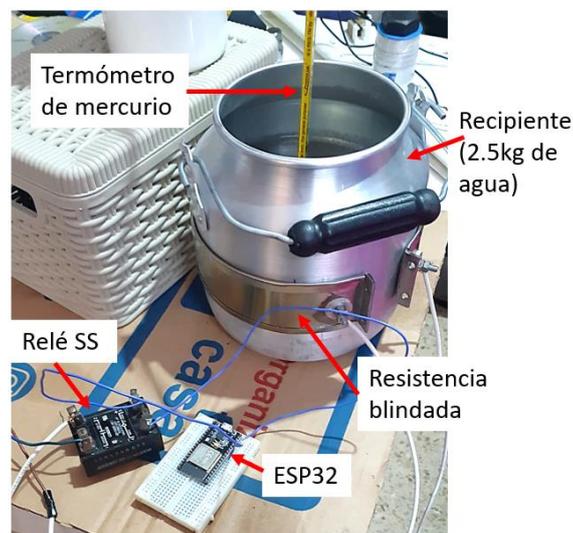
### 2.9.2 Diseño del control de temperatura

Se realizó una identificación experimental de la planta. Para esto, se colocó un relé de estado sólido en serie con la resistencia, enviando la señal de control mediante el microcontrolador. Se programó un ciclo de trabajo del 33%, en un período de 3 segundos, para enviar un voltaje promedio de 40V. Se utilizó un termómetro de mercurio y un cronómetro para tomar datos de la planta en lazo abierto, hasta que la temperatura se estabilizó. A partir de esta gráfica se aproximó la ecuación representativa del sistema.

$$G(S) = \frac{1.475 e^{-120 S}}{990 S + 1} \quad (2.1)$$

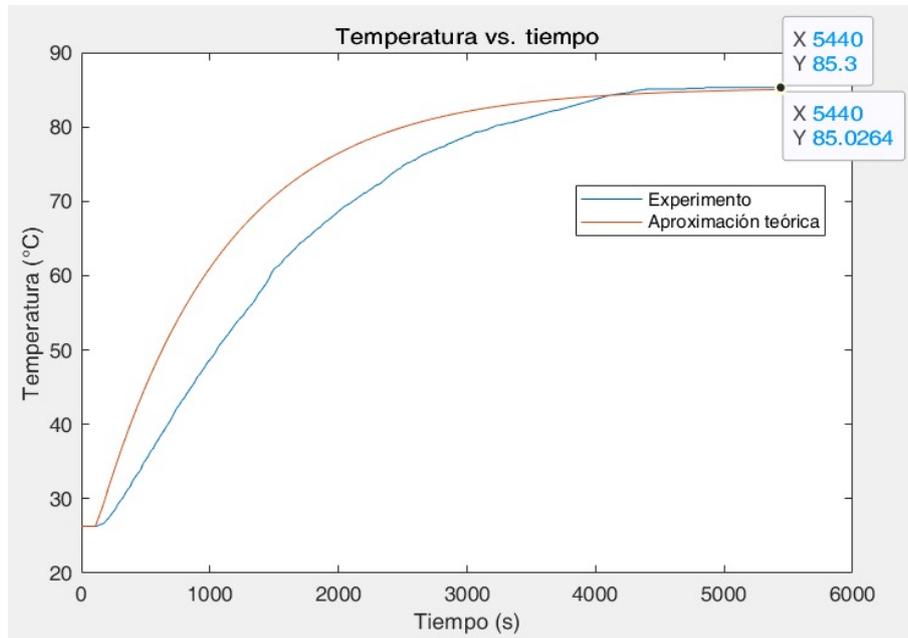
Figura 2.28

Configuración del experimento de identificación de planta



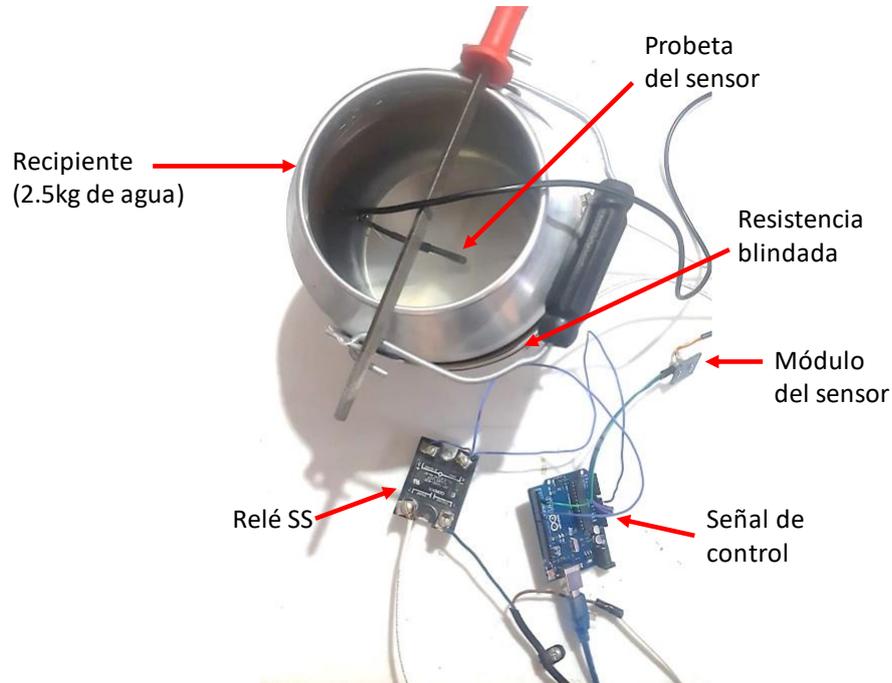
**Figura 2.29**

*Comparación de curvas de planta experimental y teórica*



Se utilizó esta ecuación para generar una simulación en Simulink (Matlab), en la cual se sintonizaron los parámetros para el controlador PID (proporcional-integral-derivativo) de temperatura. Para esto, inicialmente se anulaban los componentes integral y derivativo, mientras se varió la constante proporcional hasta obtener una respuesta del sistema con oscilaciones moderadas. Luego, se procedió a variar la constante integral hasta lograr disminuir el error de estado estable. Finalmente, se manipuló la constante derivativa para conseguir disminuir el sobrenivel porcentual.

El correcto funcionamiento del controlador fue confirmado al implementarse en un código en la ESP32. Este recibe la señal del sensor de temperatura mencionado y calcula el voltaje requerido para el ajuste. Luego, envía una señal de control a un relé de estado sólido para variar su ciclo de trabajo, proporcionando el voltaje promedio adecuado a la resistencia en un período de 3 segundos.

**Figura 2.30***Configuración experimental de prueba del controlador*

## 2.10 Diseño del subsistema: pH

Según las especificaciones del cliente, el sistema debe ser capaz de mantener el pH dentro del rango de 4.5 a 7.0. Esto se consiguió utilizando una solución ácida de ácido clorhídrico (HCl) y una solución básica de hidróxido de sodio (NaOH). Ambas soluciones se añaden al líquido por goteo cuando se requiera ajustar el pH actual. Para esto, se modificaron los mecanismos de los sueros añadiendo un acople que permite el estrangulamiento de la manguera mediante un servomotor.

Para la retroalimentación del pH actual se utilizó el sensor PH0-14, el cual incluye un módulo digital para su lectura y una sonda apta para sumergirse en el líquido medido.

**Tabla 2.10**

Especificaciones sensor PH0-14 BU0481 marca GAOHOU [58]

**Figura 2.31**

PH0-14 [58]

**Especificaciones**

	$V_{in}$	5 V
	$I_{av}$	5 – 10 mA
	Rango de pH	0 – 14
	Tiempo de respuesta	$\leq 1$ min

Se utilizaron soluciones estándar de pH 4.0, 7.0, y 10.0, para calibrar el sensor.

**Figura 2.32**

Calibración de sensor de pH.



## 2.11 Diseño del subsistema: Agitación

### 2.11.1 Selección de componentes (Agitación)

El contenido del recipiente debe agitarse a una velocidad regulada entre 25rpm y 100rpm, según especificaciones del cliente. La presencia de los electroimanes dificulta el uso de un agitador magnético. Por lo tanto, se decidió utilizar un agitador mecánico tipo Rushton. Este modelo de agitador se eligió ya que es uno de los más comunes en el diseño de biorreactores. Además, la simplicidad de su geometría facilita su manufacturación. Se propone que el agitador sea de acero inoxidable AISI 304, siendo este de grado alimenticio. No obstante, debido a las limitaciones para trabajar con este material, el agitador del prototipo presentado fue fabricado en material PETG mediante impresión 3D.

La potencia mínima necesaria para cumplir con la funcionalidad deseada se calculó como se muestra en la sección Apéndice C. En función de esto y de la disponibilidad local, se seleccionó el motor DC GA25-370, con la reducción de velocidad apropiada. Adicionalmente, el componente adquirido cuenta con un encoder integrado que permite la retroalimentación de la velocidad para un control más preciso.

**Tabla 2.11**

*Especificaciones motor GA25-370 [59]*

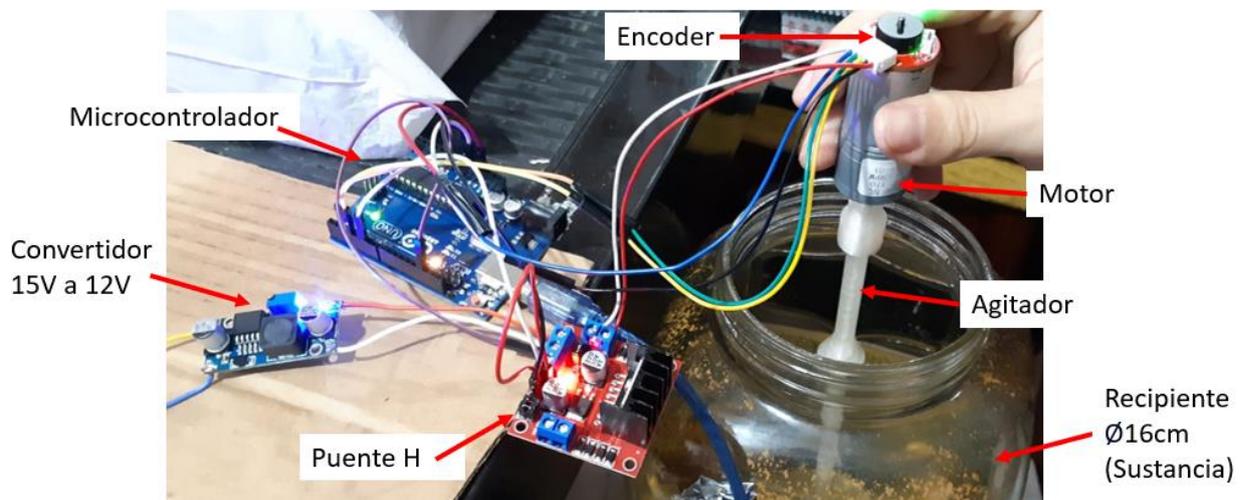
<b>Figura 2.33</b> <i>Motor GA25-370 [60]</i>	<b>Especificaciones</b>	
	$V_{in}$	12 V
	$\omega_{no\_load}$	130 rpm
	$\omega_{rated\_load}$	100 rpm
	Potencia	3.5 W

### 2.11.2 Diseño del control de velocidad

Se realizó un control PID para controlar la velocidad de agitación. Las constantes de este controlador se definieron mediante una sintonización experimental. Para esto, se acopló el agitador al eje del motor y se lo sumergió en la misma sustancia usada para las pruebas de campo magnético. Se leyó la velocidad actual mediante la señal del encoder, permitiendo al microcontrolador enviar una señal PWM para controlar el voltaje aplicado al motor mediante un puente H L298N. Se realizaron ajustes en las constantes PID observando la respuesta en tiempo real del sistema.

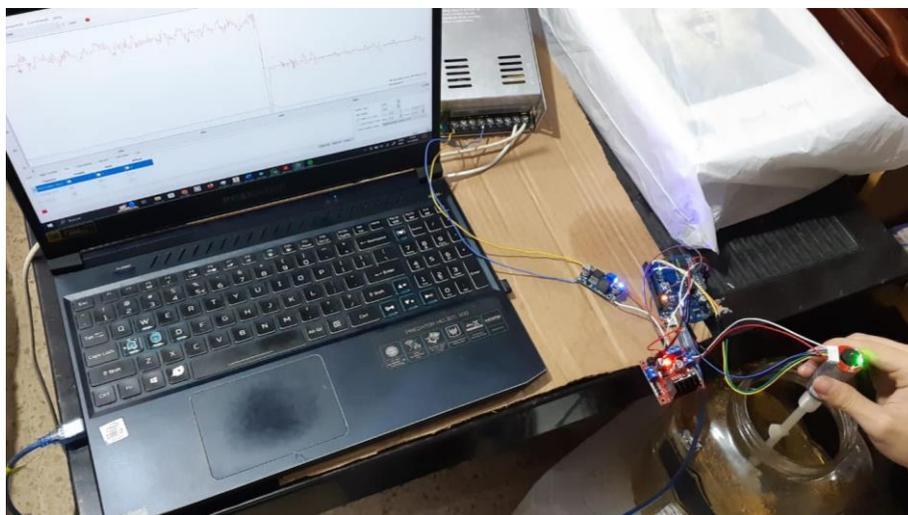
**Figura 2.34**

*Circuito de control y fuerza del agitador.*



**Figura 2.35**

*Sintonización experimental del PID de agitación.*



## 2.12 Diseño de la interfaz de usuario

Se consideró que una pantalla de 3.4 pulgadas es apropiada para mostrar la información del proceso permitiendo una visualización agradable. Además, se garantiza una cómoda experiencia para el usuario durante el ajuste de parámetros y otras configuraciones del sistema. La pantalla táctil de Elecrow que se detalla en la siguiente tabla cuenta con su propio microcontrolador ESP32 para el procesamiento de los eventos del sensor táctil y la actualización de los gráficos. Además, existen varios softwares de ordenador que facilitan su programación, entre ellos Squareline Studio.

**Tabla 2.12**

*Especificaciones pantalla táctil Elecrow Wizee-ESP32 WZ4827R043 [61]*

**Figura 2.36**

*Pantalla Elecrow Wizee-ESP32 [61]*

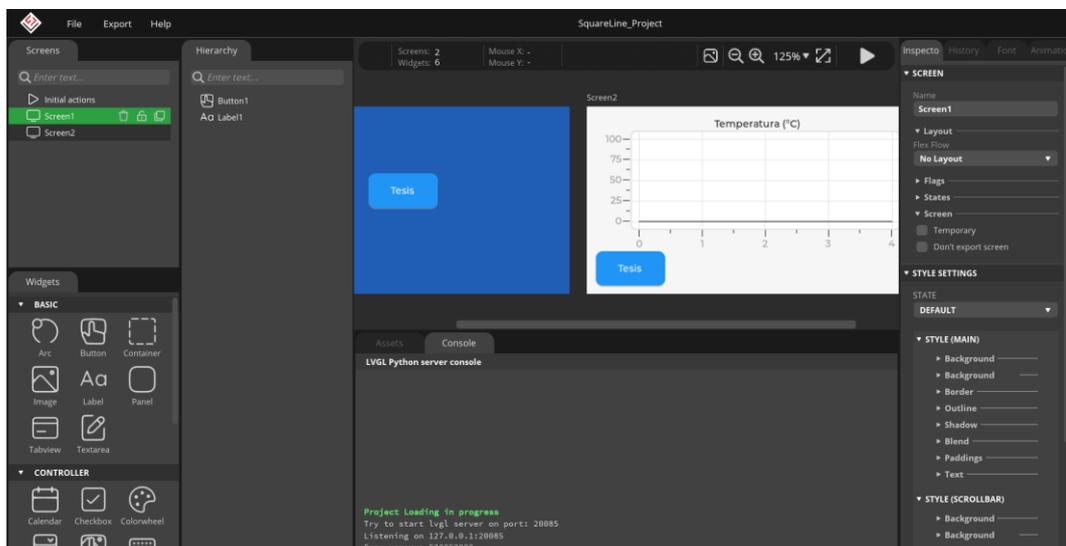
### Especificaciones



Tamaño	4.3 in (480 x 272)
Tecnología táctil	Resistiva
Microcontrolador	ESP32
Memoria Flash	4 MB
Comunicación	UART

**Figura 2.37**

*Software Squareline Studio*



### 2.13 Otros sensores

El diseño del dispositivo permite la medición de CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> emitido por el producto. Para esto, se seleccionaron los sensores distribuidos por Arduino: MG-811 y Grove-Gas Sensor. Estos sensores se presentarán solo dentro del diseño del equipo, mas no se implementarán en la prueba de concepto.

#### Figura 2.38

*Sensor de CO<sub>2</sub> MG-811 [62]*



#### Figura 2.39

*Grove Gas Sensor (O<sub>2</sub>) [63]*



### 2.14 Aspectos éticos y legales

Este proyecto se desarrolló utilizando programas gratuitos como Pycharm y Arduino IDE, y con licencias universitarias en softwares como Inventor y Matlab. Adicionalmente, se utilizó una prueba gratis de 30 días en Squareline Studio.

La propuesta realizada es ética y positiva desde el punto de vista del utilitarismo. Esto debido a que su desarrollo fomenta la investigación para promover áreas como la industria alimentaria. Esto generaría beneficios a un amplio sector de la población, economizando el acceso a la alimentación. Adicionalmente, su aplicación en la

producción de biocombustibles incentiva el desarrollo de energías renovables, generando un impacto medioambiental favorable.

En cuanto a los posibles riesgos de la implementación en masa del dispositivo se puede considerar la poca atención a la calidad de los materiales empleados. Es decir, que con el objetivo de disminuir costos se adquieran materiales de poca calidad que no sean realmente de grado alimenticio. Esto podría generar daños a la salud de los consumidores, por lo cual es una prioridad verificar la información manifestada por los proveedores.

## **Capítulo 3**

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

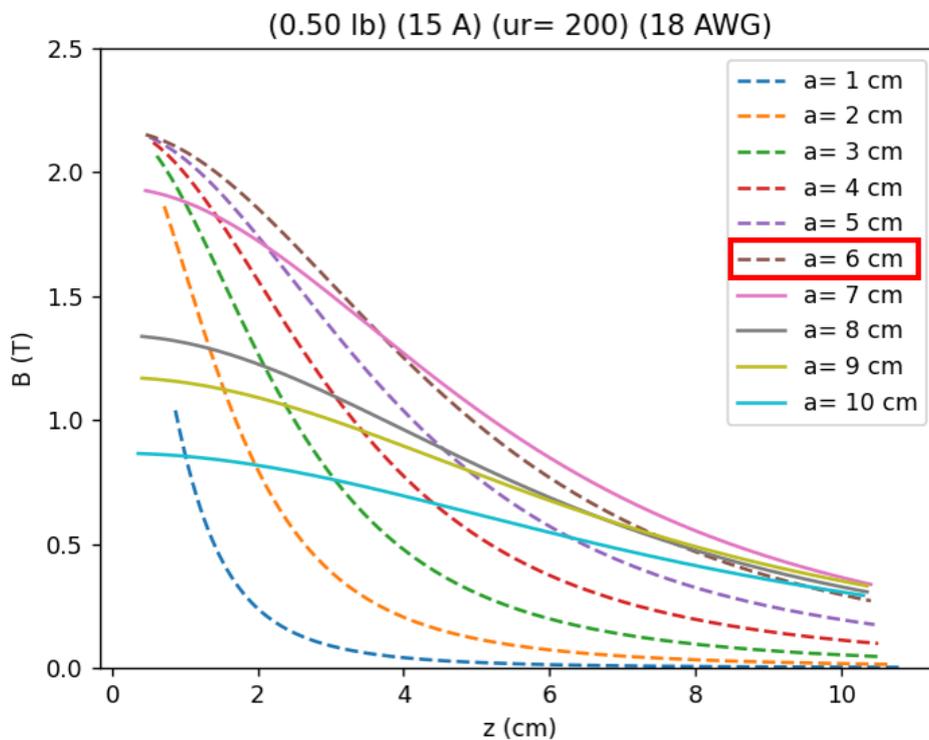
#### 3.1 Resultados del subsistema campo magnético

Se utilizó un código en Python para calcular el campo magnético en el eje de bobinas de diferentes radios, considerando los 3 escenarios descritos en la sección de Metodología (Figura 2.14). Es decir, fijando los parámetros de permeabilidad magnética del núcleo, peso del cable por bobina, calibre del cable, y corriente en cada electroimán. Adicionalmente, se utilizaron curvas punteadas para representar el escenario de saturación del núcleo.

Para un arreglo de 2 bobinas, se observó que el radio de 6cm genera el mayor campo magnético en la superficie del núcleo. Al aumentarse la altura en el eje, el campo magnético disminuye, sin embargo, la diferencia respecto a otros radios no es tan significativa. Por lo tanto, se escogió esta dimensión como la más conveniente en el primer escenario, la cual permite obtener una relación de 81 vueltas por 15A.

**Figura 3.1**

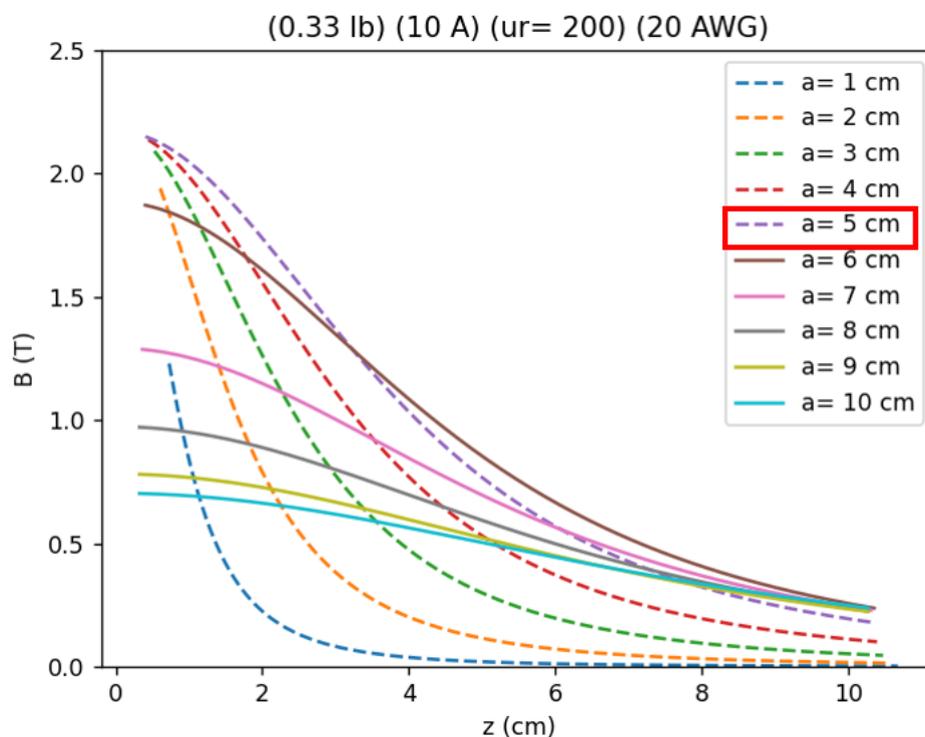
*Campo magnético en el eje del electroimán (Arreglo de 2 bobinas).*



En el segundo escenario con 3 bobinas, se observó que la que presenta un mejor comportamiento corresponde a los 5cm de radio. Como se observa, la curva correspondiente presenta el máximo campo magnético en la superficie del electroimán. Además, a pesar de que otras curvas poseen mayores magnitudes cuando la distancia aumenta, se puede afirmar que  $a=5\text{cm}$  es la de mayor área bajo la curva, indicando una distribución más conveniente del campo magnético. Escogiendo este tamaño se obtienen 3 bobinas, cada una con una relación de 100 vueltas por 10A.

### Figura 3.2

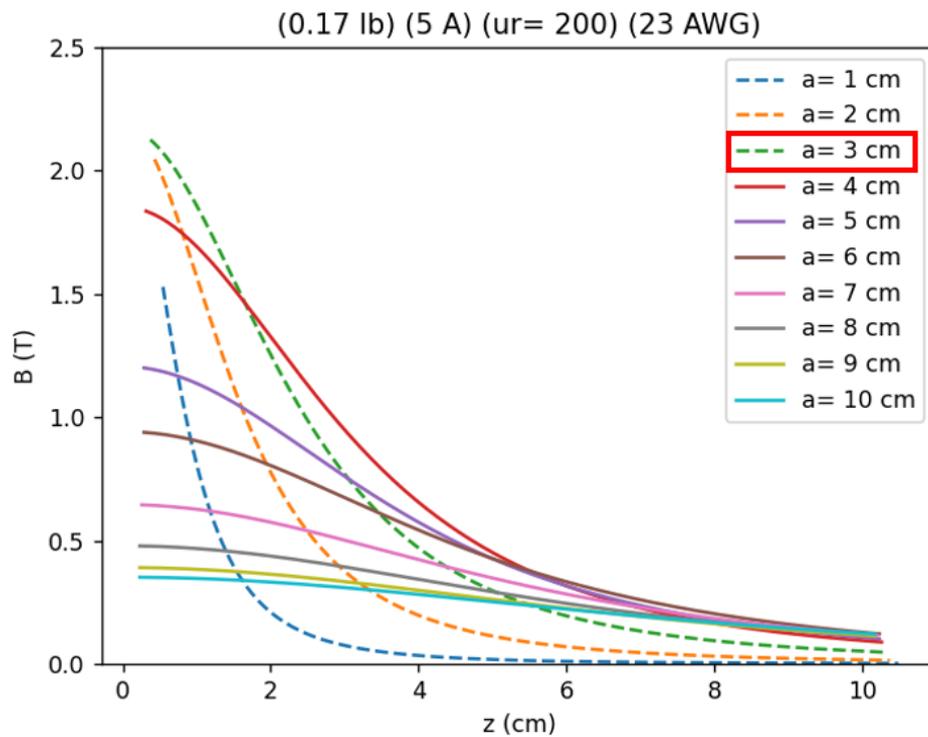
*Campo magnético en el eje del electroimán (Arreglo de 3 bobinas).*



Para el tercer escenario considerando 6 bobinas, se decidió que el radio con mejor comportamiento corresponde a  $a=3\text{cm}$ . Esto debido a que presenta el máximo campo magnético a una distancia  $z=0\text{cm}$ , es decir, justo sobre la superficie. En este caso, se obtiene una relación de 169 vueltas por 5A en cada bobina.

**Figura 3.3**

*Campo magnético en el eje del electroimán (Arreglo de 6 bobinas).*



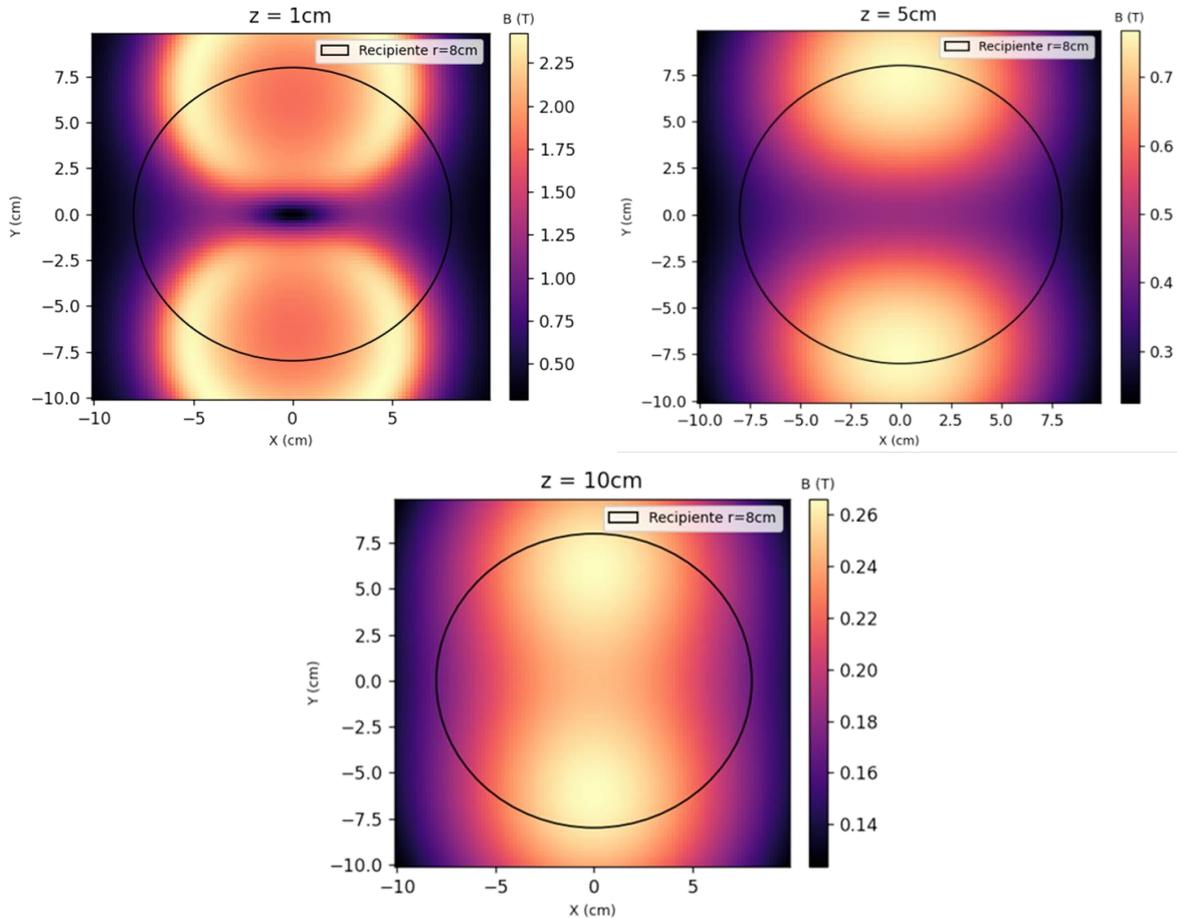
Como se observa, en todos los escenarios se dio prioridad a las curvas que presentan un mayor campo magnético en la superficie del electroimán. Esta posición corresponde a la base del recipiente, en la cual se asientan las nanopartículas. Por lo tanto, resulta importante que esta posea un campo magnético alto que garantice que las partículas no serán arrastradas durante la descarga de líquido. Además, se seleccionaron dimensiones para las cuales el núcleo ferromagnético se encuentre saturado. Esto garantiza que las propiedades del material están siendo totalmente aprovechadas. Además, dado que la corriente de saturación es menor a la aplicada, se asegura que incluso en caso de experimentarse pequeñas caídas de voltaje, el campo magnético se mantendrá constante.

Conociendo los radios seleccionados para cada cantidad de bobina, se procedió a comparar el desempeño de los tres arreglos. Para esto, se utilizó la herramienta *colormaps* para visualizar la intensidad del campo magnético en una superficie paralela a la cara del electroimán a tres alturas diferentes.

Se pudo observar que el comportamiento del arreglo de dos electroimanes presenta zonas donde la intensidad del campo magnético cae drásticamente. Esto sucede justo en el centro, entre ambas bobinas, generando una franja horizontal donde las partículas no se atraerían correctamente.

**Figura 3.4**

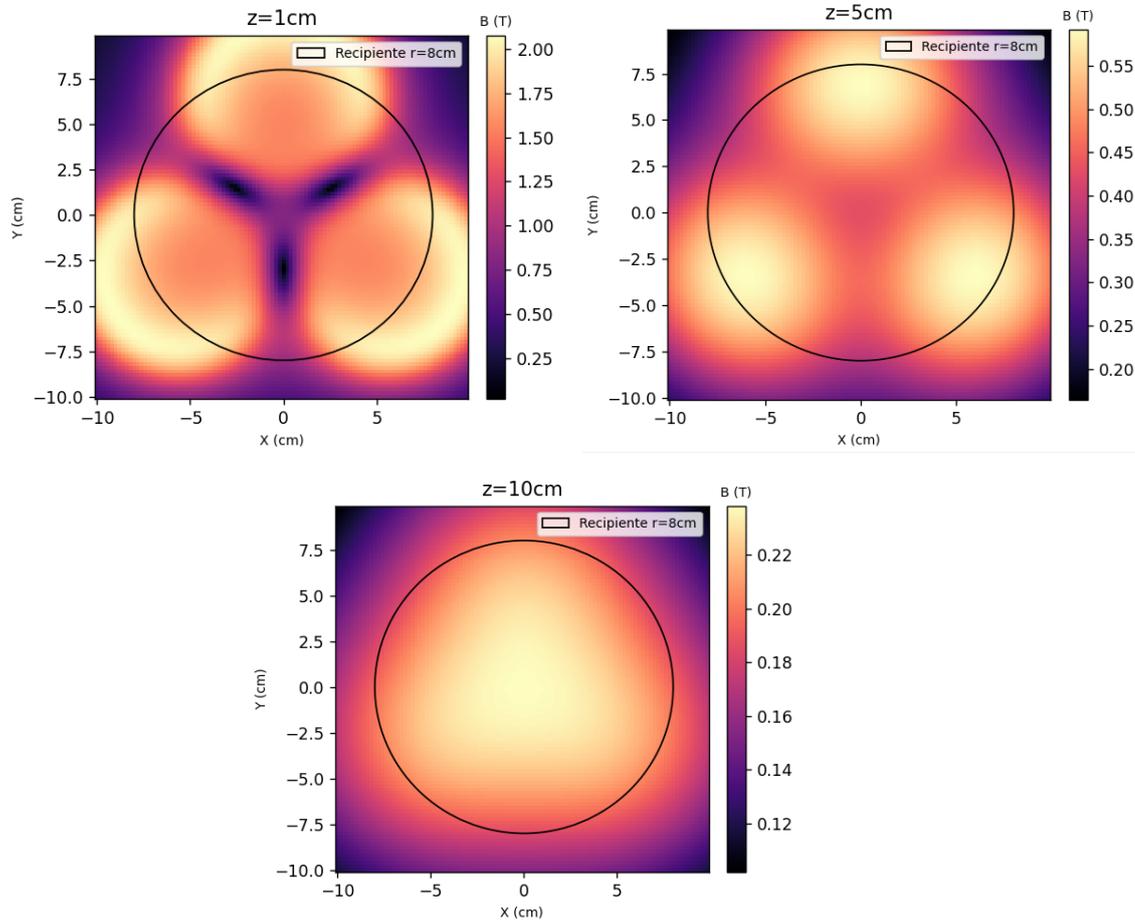
*Campo magnético en un plano a 1 cm, 5 cm y 10 cm de altura de un arreglo de 2 bobinas de 6 cm de radio cada una.*



En el segundo escenario de 3 bobinas por arreglo, el campo magnético en general disminuye ligeramente respecto al caso anterior. No obstante, las zonas críticas de bajo campo magnético son mucho más pequeñas. Además, la distribución se uniformiza con mayor rapidez. A una altura de 5cm, toda el área analizada experimenta magnitudes de campo magnético entre 0.45T y 0.6T, sin decaer exageradamente. Para una altura de 10cm, la gráfica muestra un campo magnético dentro del recipiente casi constante de alrededor de 0.24T, lo cual cumple con las expectativas del cliente.

**Figura 3.5**

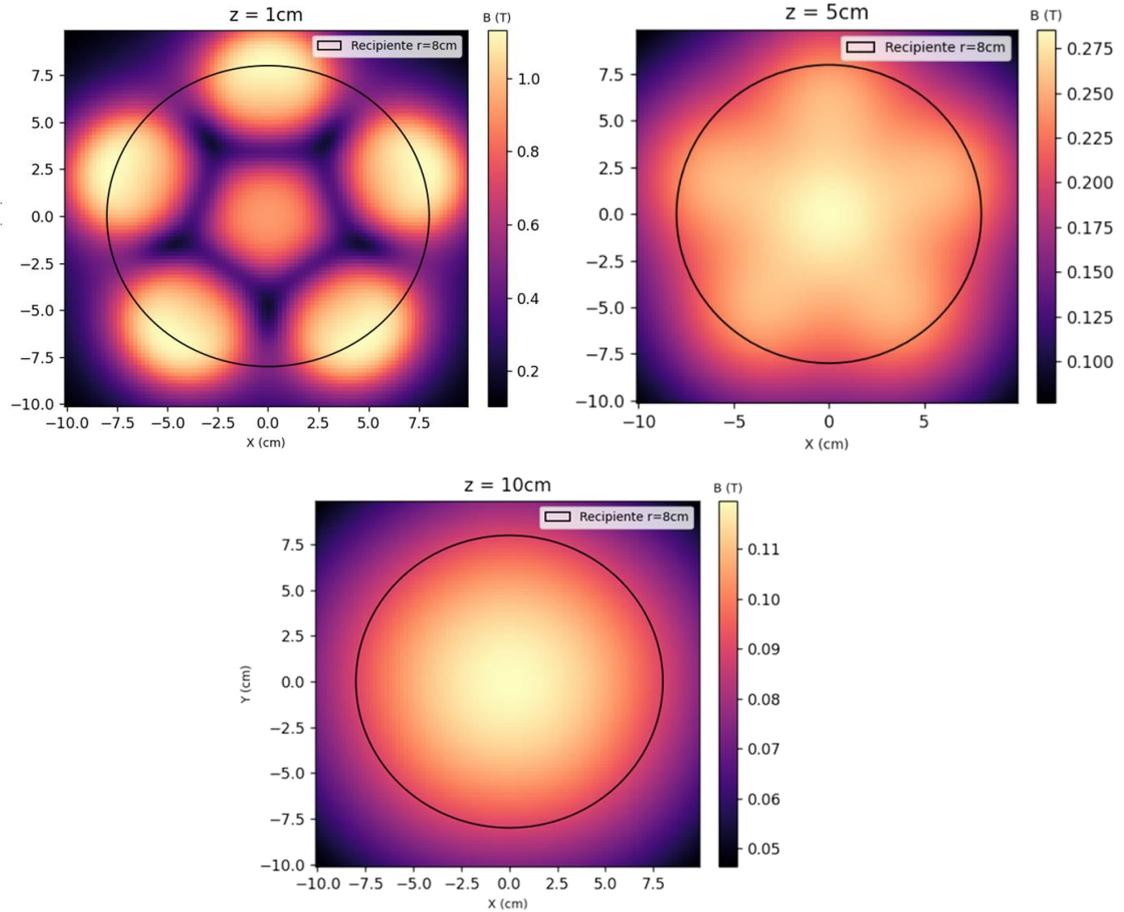
*Campo magnético en un plano a 1 cm, 5 cm y 10 cm de altura de un arreglo de 3 bobinas de 5 cm de radio cada una.*



En el caso final de 6 bobinas, se presenta una mayor cantidad de zonas de bajo campo magnético. Además, en general, la intensidad del campo decae casi a la mitad de la experimentada en el escenario anterior.

**Figura 3.6**

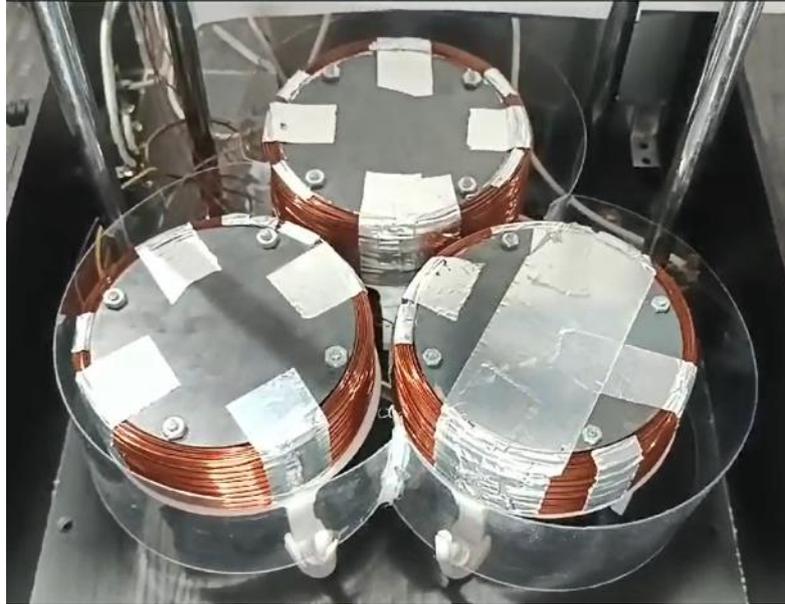
*Campo magnético en un plano a 1 cm, 5 cm y 10 cm de altura de un arreglo de 3 bobinas de 5 cm de radio cada una.*



En consecuencia, se seleccionó el arreglo de 3 electroimanes de 5cm de radio como la opción más apropiada. Estos electroimanes se construyeron con un núcleo de acero A36 y cable de cobres esmaltado calibre 20. Detalles sobre la construcción se especifican en el Apéndice D.

**Figura 3.7**

*Arreglo de electroimanes construido con ventiladores, soportes y canal de ventilación.*



Para comprobar el funcionamiento de estos electroimanes, se realizó una prueba para comparar el descenso de partículas de hierro (revelador) por gravedad, y en presencia de un campo magnético. A continuación, se muestran fotografías de un recipiente de vidrio con las mismas dimensiones que el escogido, luego de un minuto de decantación en ambas condiciones. Se observa una diferencia significativa en la cantidad de partículas que continúan dispersas en el líquido luego de este tiempo de reposo. De esta forma se confirma que las bobinas aceleran la sedimentación de las partículas. Además, se puede observar cómo estas se alinean en consecuencia del campo magnético, indicando que se adhieren a la base. En la sección de Apéndice D se muestra la secuencia completa de imágenes tomadas cada 10 segundos durante el experimento.

**Figura 3.8**

*Comparación de decantación de partículas de hierro por gravedad y en presencia del campo magnético.*

Sin electroimanes (gravedad)



Con electroimanes (campo magnético)



Al simular una descarga por una llave inferior (reubicando las bobinas únicamente durante este experimento), se puede observar cómo las partículas se adhieren a las superficies donde se encuentran las bobinas. Se comprueba que las partículas se mantienen retenidas, mientras el nivel del líquido desciende hasta vaciar el recipiente.

**Figura 3.9**

*Partículas retenidas durante la descarga del líquido por una llave inferior.*



Finalmente, se realizaron pruebas utilizando una bomba de succión. Se observó que al extraer el líquido sin activar los electroimanes, parte de las partículas de hierro son removidas del recipiente. Por otro lado, al repetir el experimento bajo la acción del campo magnético, todas las partículas se mantuvieron dentro del recipiente, comprobando nuevamente la eficacia del sistema de retención mediante campos magnéticos.

**Figura 3.10**

*Partículas removidas durante la descarga sin la presencia de campo magnético.*



### 3.2 Resultados del subsistema de temperatura

Se simuló la ecuación (2.1) de la planta obtenida en Matlab. Observando la respuesta simulada del sistema en lazo cerrado, se sintonizó un controlador PID. Los parámetros obtenidos fueron:

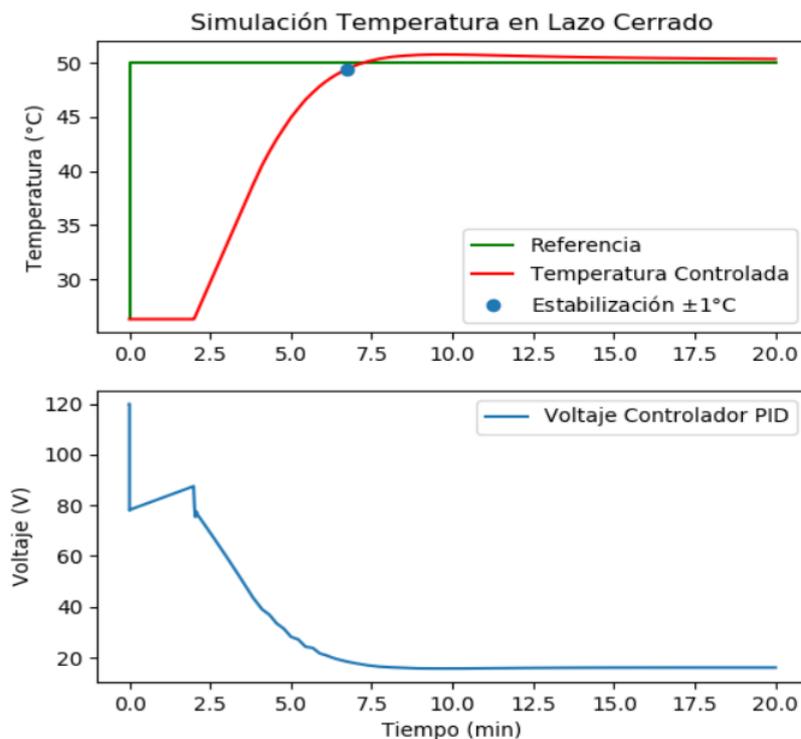
$$P = 3.3$$

$$I = 0.0033$$

$$D = 82.5$$

**Figura 3.11**

*Respuesta del controlador simulado*

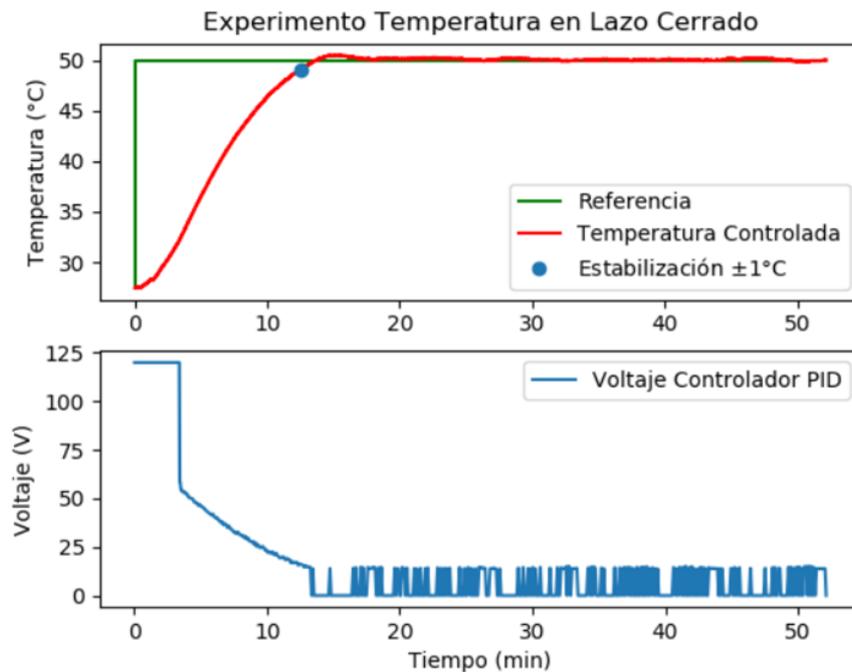


Se realizaron pruebas experimentales con estos valores, considerando solo este subsistema. En el experimento con una temperatura deseada de 50°C se logró alcanzar el estado estable en un tiempo de aproximadamente 13min, con un sobrenivel menor a 1°C. Se destaca que el voltaje graficado en la figura inferior corresponde al voltaje promedio, lo cual se implementa variando el tiempo de encendido y apagado de la resistencia. Debido al tiempo de lectura del sensor, los voltajes muy pequeños que corresponden a un tiempo de encendido menor a 0.5seg no logran ejecutarse. En

consecuencia, el mínimo voltaje admitido fue 13.7V. Esta es la razón por la que se observan pulsos de voltaje en el estado estable.

**Figura 3.12**

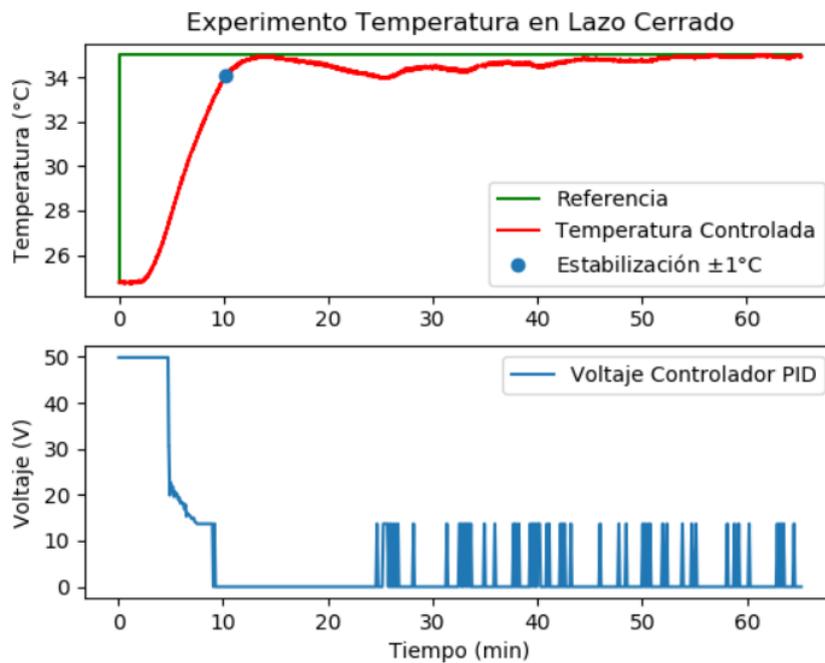
*Control experimental del subsistema de temperatura con referencia de 50°C*



En el caso de una temperatura deseada de 35°C, el tiempo de estabilización fue menor, de aproximadamente 10min, y no se presentó sobrenivel porcentual. El error en estado estable fue negativo. Esto es beneficioso, ya que las enzimas y bacterias son sensibles a temperaturas altas. Nótese que con el fin de mejorar los tiempos de estabilización, se decidió enviar un voltaje promedio constante al inicio del experimento, cuando la temperatura actual continúa muy lejos de la referencia. La magnitud de este voltaje y el tiempo que permanece encendido varían en función del cambio de temperatura deseado.

**Figura 3.13**

*Control experimental del subsistema de temperatura con referencia de 35°C*



### 3.3 Resultados del subsistema de agitación.

Se diseñó e imprimió en 3D un agitador tipo Rushton, en material PETG. Se demostró que este material permite soportar el torque y la temperatura de 50°C sin deformar el eje.

**Figura 3.14**

*Agitador Rushton impreso en PETG*



Se realizó la sintonización experimental del motor del agitador. Para esto, se utilizó la sustancia proporcionada por el cliente en el volumen de agua del recipiente principal. Luego, se ajustaron los parámetros PID observando la respuesta del encoder hasta obtener un comportamiento aceptable. El controlador definido contó con las constantes:

$$P = 0.18$$

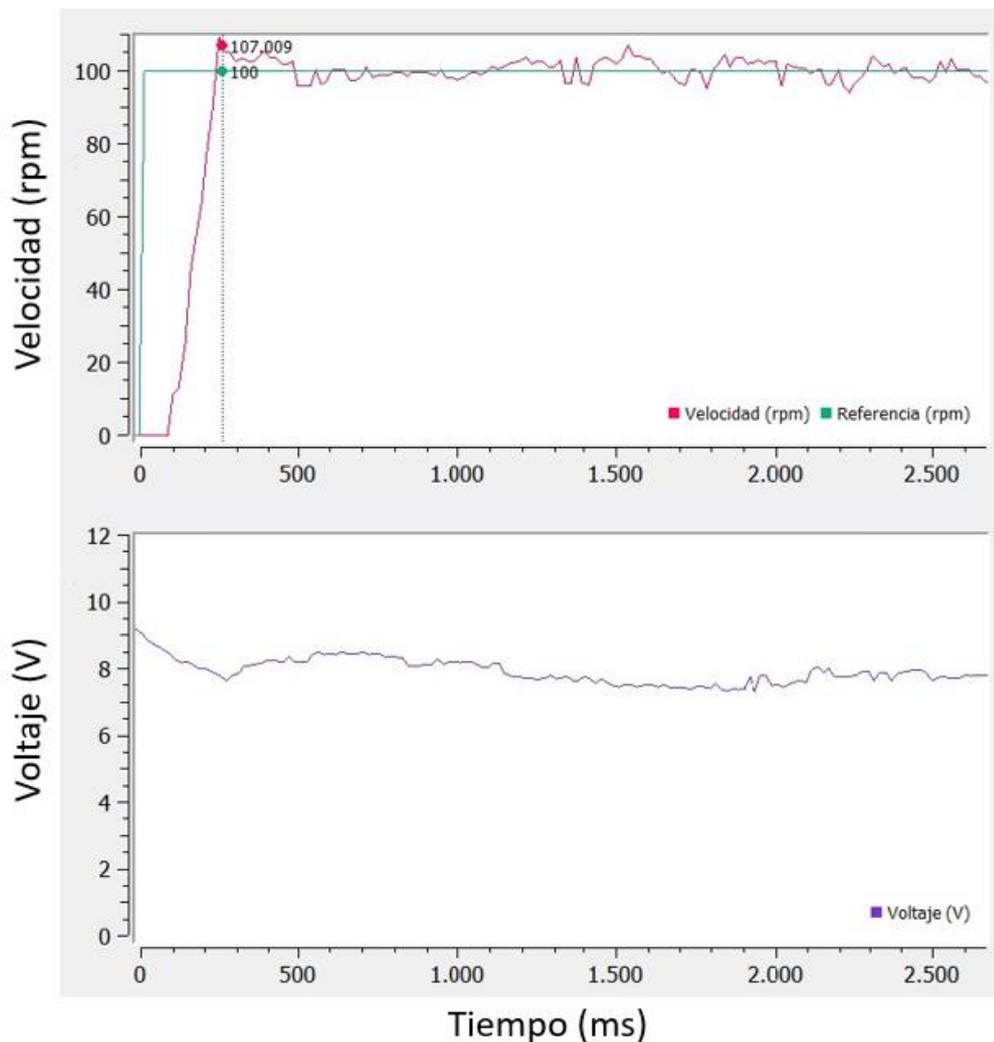
$$I = 0.8$$

$$D = 0.0016$$

Se evaluó el funcionamiento de este controlador, realizando pruebas experimentales de este subsistema independientemente. Nótese que en todos los escenarios se logra estabilizar la velocidad deseada, manteniendo oscilaciones moderadas. Además, la estabilización se da en los primeros segundos.

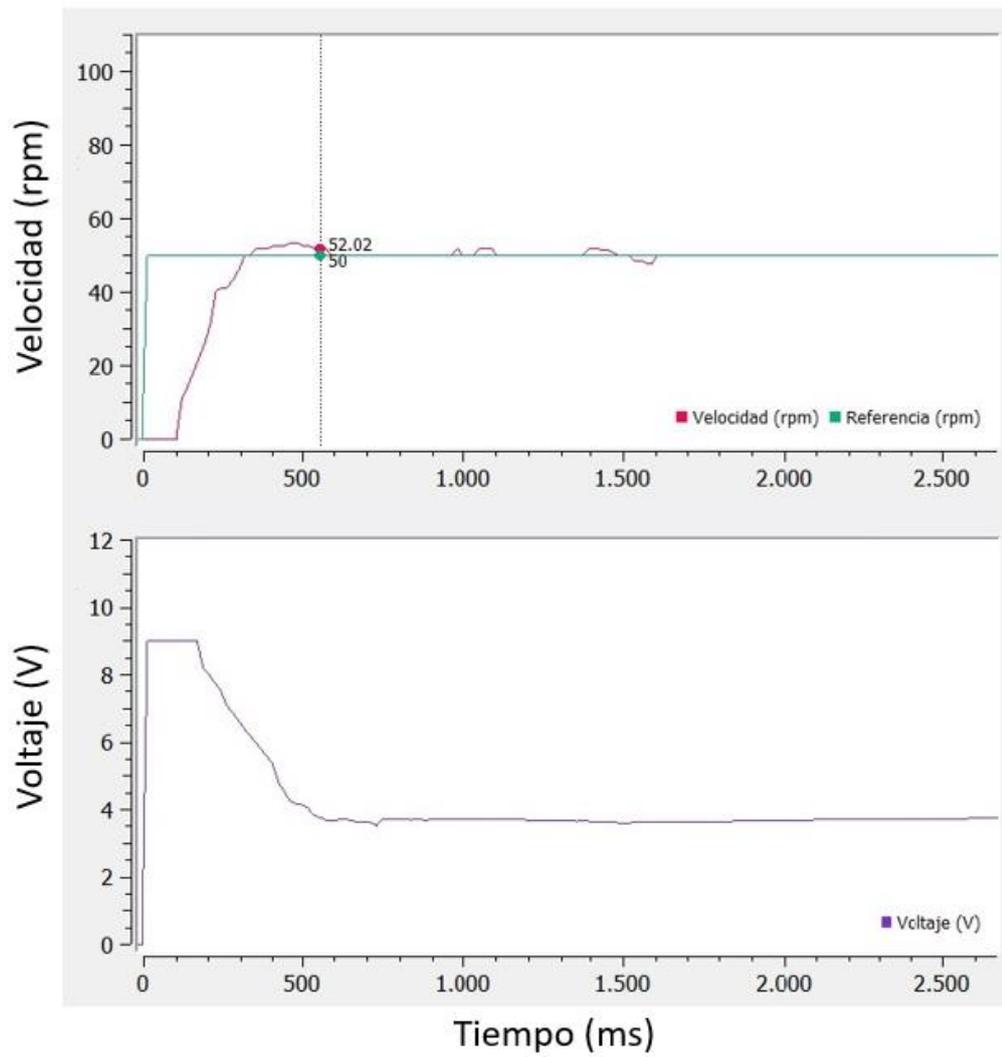
**Figura 3.15**

*Pruebas experimentales de agitación con referencia de 100rpm*



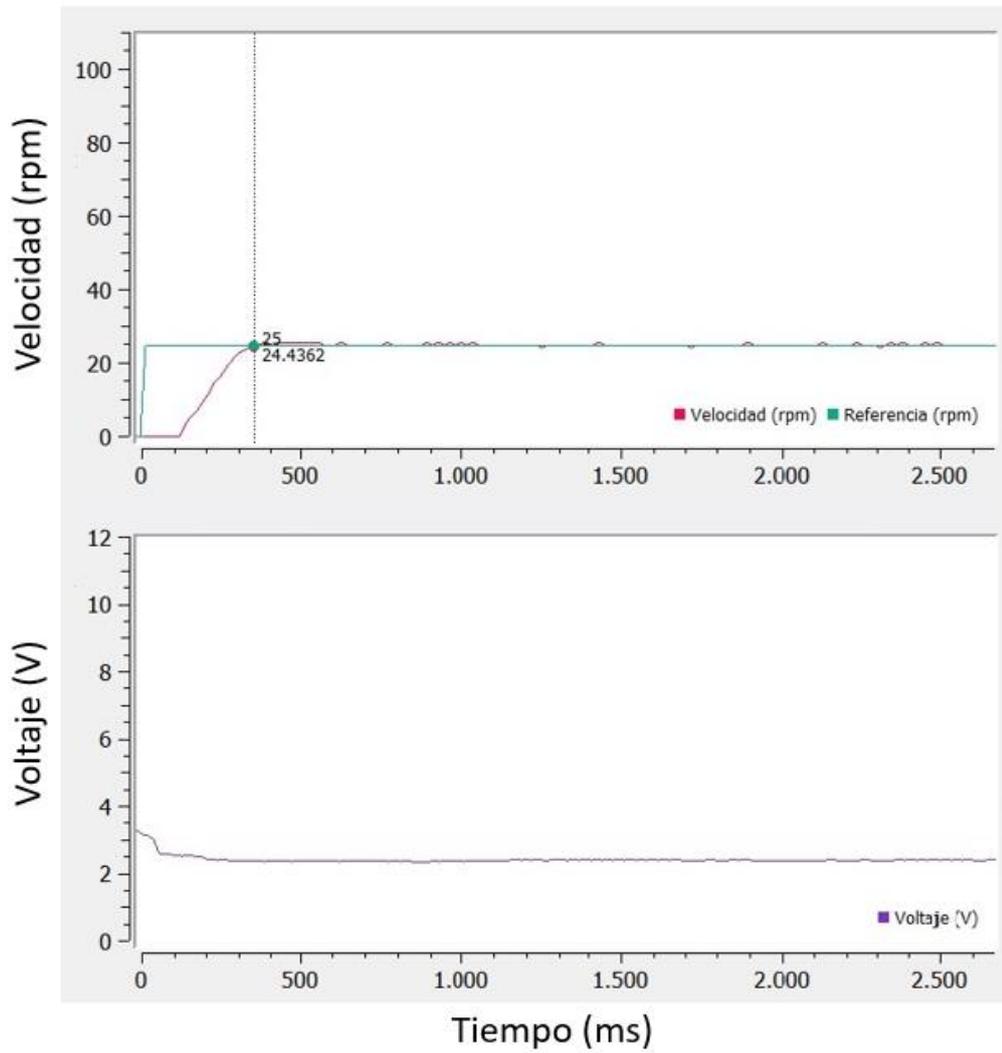
**Figura 3.16**

*Pruebas experimentales de agitación con referencia de 50rpm*



**Figura 3.17**

*Pruebas experimentales de agitación con referencia de 25rpm*



### 3.4 Resultados del subsistema de pH.

Para el control de pH se prepararon soluciones de ácido clorhídrico (HCl) 0.47M e hidróxido de sodio (NaOH) 0.5M. Estas concentraciones se escogieron luego de realizar pruebas manuales y observar la velocidad con que el pH varía. Se consideró que una velocidad de 0.5 unidades por cada 6 gotas era adecuada.

Se obtuvo la versión final del mecanismo de goteo. Este utiliza la cámara de goteo de los equipos de venoclisis para permitir visualizar las gotas administradas. Luego, una leva comandada por un servomotor permitió doblar la manguera, permitiendo y obstruyendo el paso del líquido según se necesite. Se emplearon botellas de plástico como recipientes para albergar las soluciones.

#### Figura 3.18

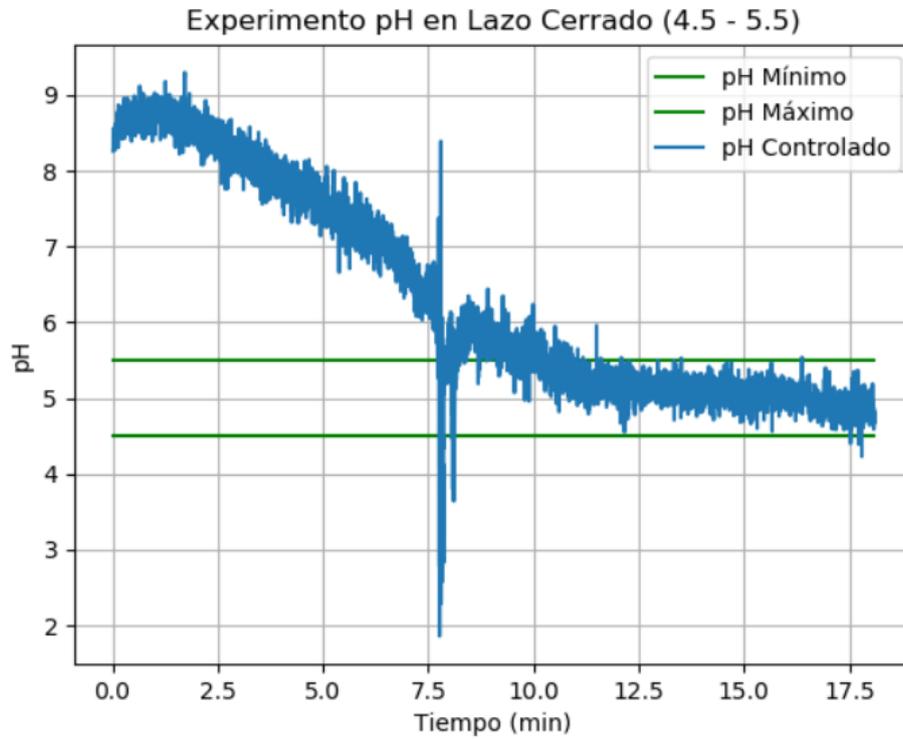
*Mecanismo de goteo de soluciones reguladoras de pH.*



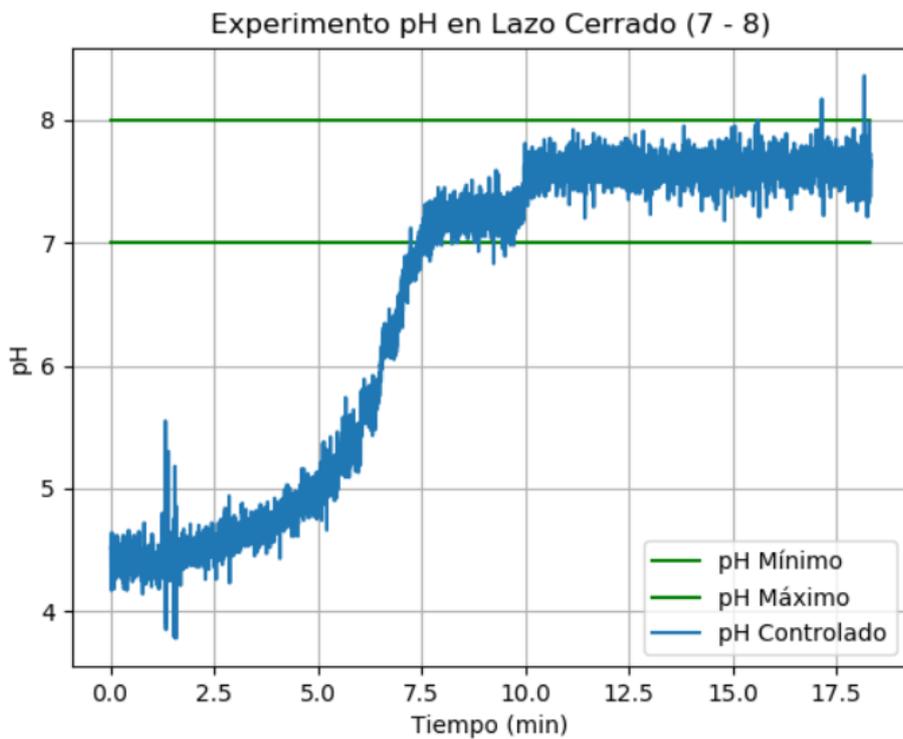
Para el control, el sensor mide el pH actual y, en caso de no encontrarse en el rango indicado, administra la solución necesaria (ácida o básica) durante 5 segundos. Luego, se esperan 15 segundos mientras la solución se mezcla correctamente con el contenido antes de la siguiente medición. Siguiendo esta lógica se obtuvieron los siguientes resultados para un escenario ácido entre pH4.5 y pH5.5, y un escenario básico entre pH7 y pH8.

**Figura 3.19**

*Prueba experimental regulando el pH dentro del rango de 4.5 a 5.5*

**Figura 3.20**

*Prueba experimental regulando el pH dentro del rango de 7 a 8.*



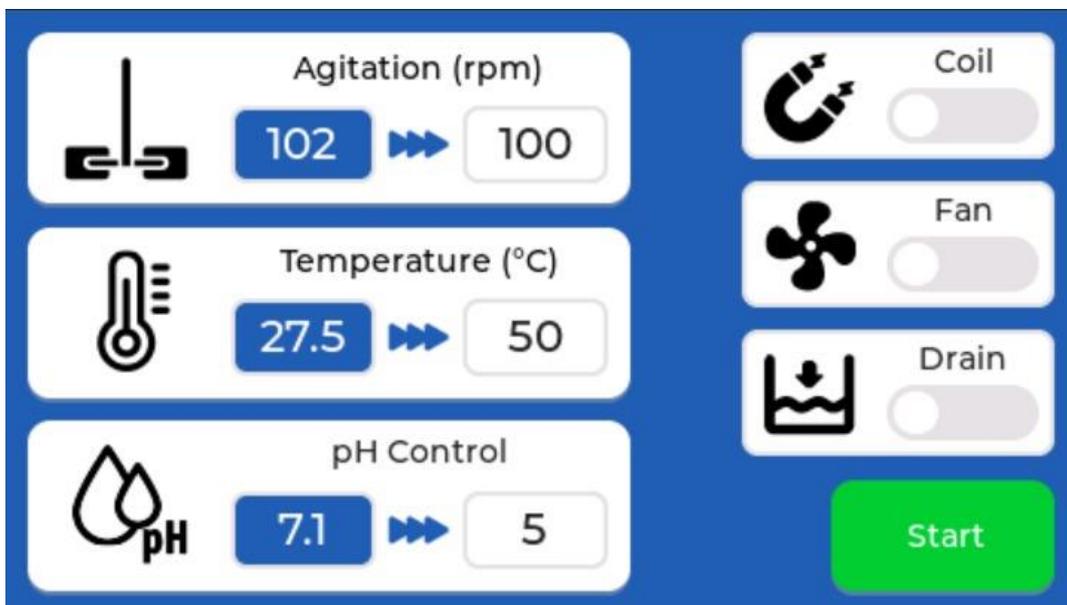
Las gráficas demostraron que los niveles de pH fueron controlados con éxito, logrando mantenerlos dentro del rango deseado. No obstante, las señales presentaron mucho ruido, con variaciones muy amplias en la medición del pH. Esto se atribuyó a la sensibilidad del sensor, y a la ausencia de un filtro de lectura.

### 3.5 Resultados de la interfaz de usuario

Se programó la pantalla seleccionada a través del software SquareLine Studio. En la pantalla principal se pueden visualizar los valores actuales junto a los valores deseados de las tres variables controladas del sistema: velocidad de agitación, temperatura, y pH. Se incluyen además interruptores para activar y desactivar los electroimanes del campo magnético, los ventiladores de las bobinas, y la bomba para vaciar el recipiente. Finalmente, se muestra el botón de inicio que permite empezar el control de las tres variables del sistema, cuando se desea comenzar un proceso de fermentación o hidrólisis.

**Figura 3.21**

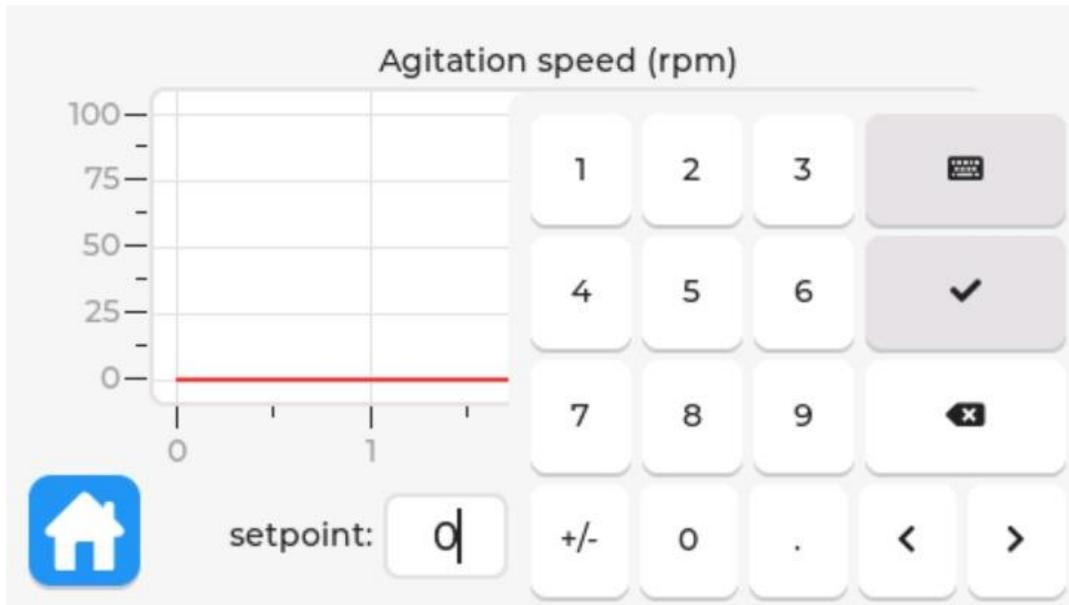
*Pantalla principal.*



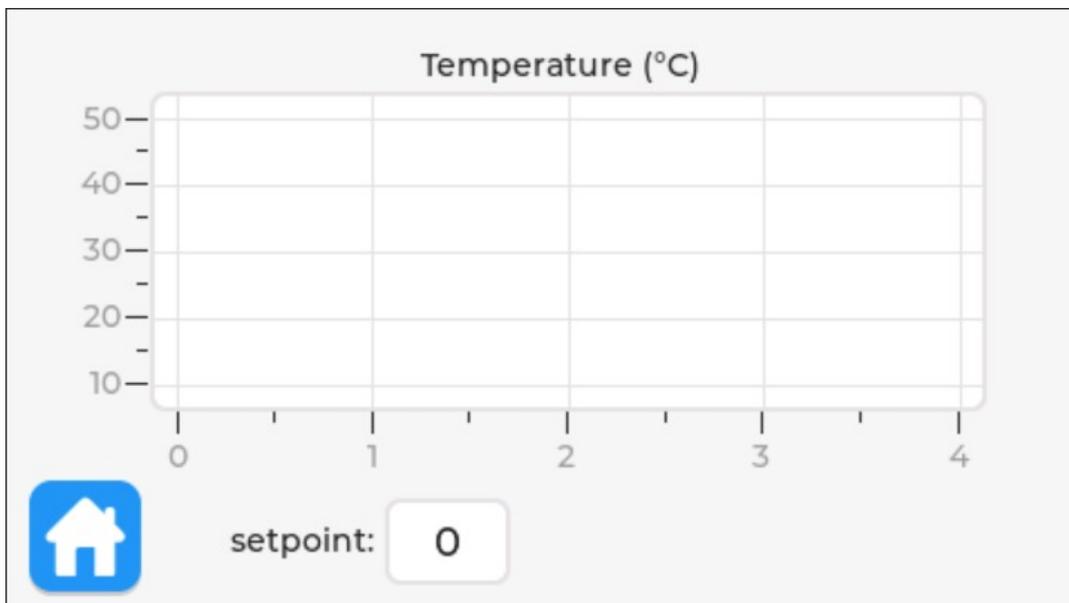
Al seleccionar cualquiera de las tres secciones de la izquierda, se abre una nueva pestaña dedicada al subsistema especificado. En este se observa el registro de las últimas mediciones del sensor correspondiente, en una ventana de tiempo. Además, se permite variar el valor deseado de dicha variable.

**Figura 3.22**

*Pantalla de gráfica de agitación*

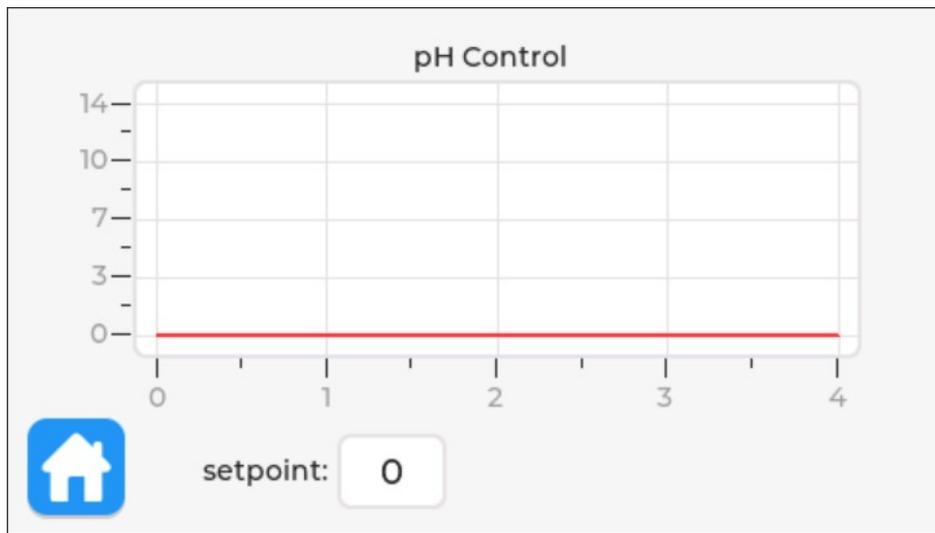
**Figura 3.**

*Pantalla de gráfica de temperatura*



**Figura 3.24**

*Pantalla de gráfica de pH*



### 3.6 Ensamble

Se unificaron todos los sistemas para implementarse en un solo dispositivo. Se sugiere que el equipo final posea una estructura de metal, con refuerzos de acrílico. Sin embargo, por motivo de costos y complejidad de manufactura, se optó por tablas de madera para la construcción del prototipo.

**Figura 3.25**

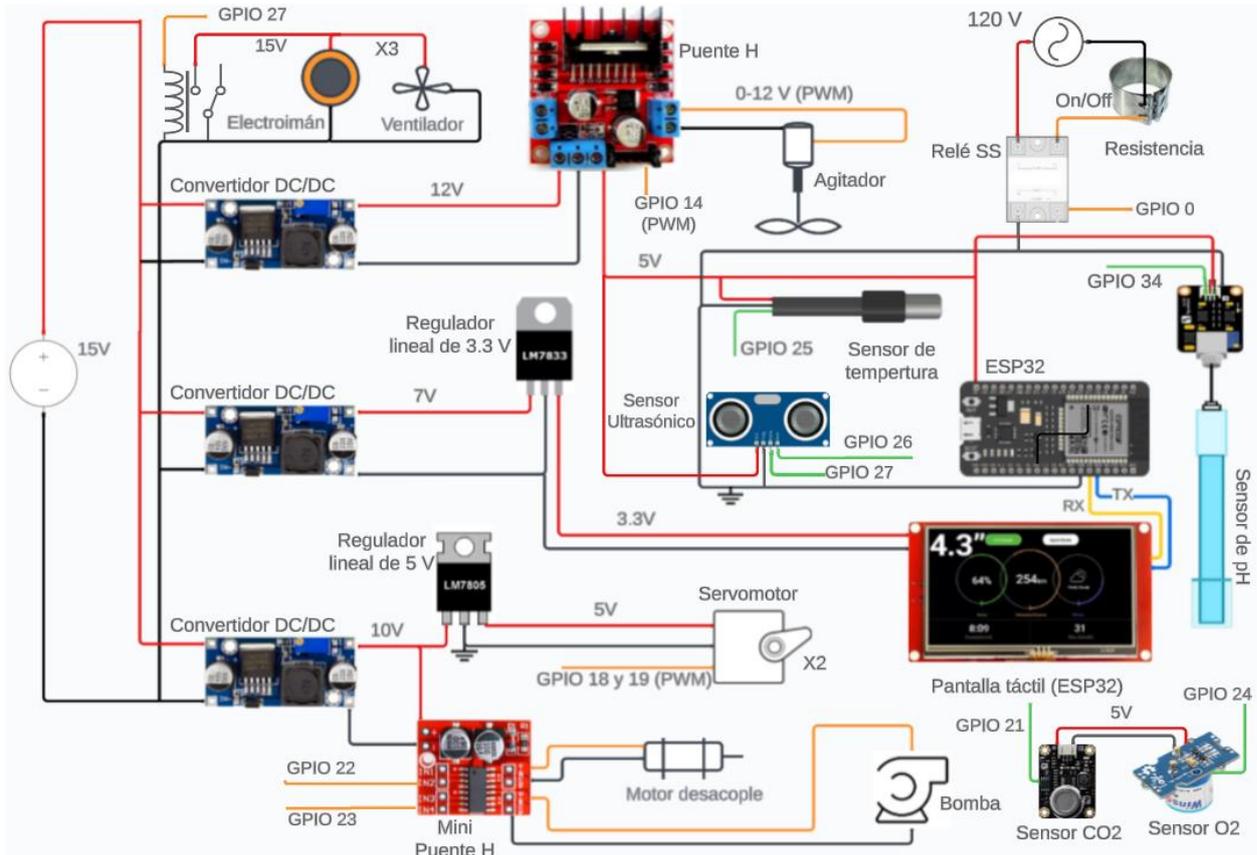
*Ensamble completo del dispositivo. Vista frontal y posterior.*



Las interconexiones de todos los componentes electrónicos se muestran en el siguiente diagrama esquemático.

**Figura 3.26**

*Diagrama esquemático del circuito general del dispositivo.*



### 3.7 Análisis de costos

Se realizó una lista de todos los componentes mecánicos, eléctricos y de control, del sistema. Estos corresponden a los incluidos a la versión final del prototipo. No obstante se utilizó el símbolo (\*) para indicar que dicho elemento no fue incluido en la implementación, y (\*\*) para denotar que fue reemplazado en el prototipo por una alternativa más asequible.

Tabla 3.1

Descripción de rubros.

Tipo de Sistema	Descripción	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)
<b>Mecánico</b>	Recipiente principal de acero inoxidable**	1	40.00	40.00
	Agitador de acero inoxidable**	1	20.00	20.00
	Mecanismos de goteo en PETG	2	5.50	11.00
	Recipientes y tapas selladas de pH	2	8.00	16.00
	Resistencia blindada	1	27.00	27.00
	Soportes de bobinas en PETG	3	10.00	30.00
	Mecanismo de acople del motor en PETG	1	12.00	12.00
	Soporte de la pantalla en PETG	1	14.00	14.00
	Estructura externa metal/acrílico**	1	50.00	50.00
	Rodamiento sellado	1	0.50	0.50
	Manguera (m)	2	2.50	5.00
<b>Eléctrico y Control</b>	ESP32	1	7.00	7.00
	Fuente DC 12V	1	30.00	30.00
	Núcleos de electroimanes	3	8.00	24.00
	Cable esmaltado - electroimanes (lb) **	3	23.99	71.97
	Pantalla táctil	1	25.29	25.29
	Ventiladores	3	4.50	13.50
	Sensor de temperatura DS18B20	1	6.83	6.83
	Sensor PH0-14 BU0481	1	31.99	31.99
	Sensor Grove Gas O2*	1	56.12	56.12
	Sensor CO2 MG811*	1	44.61	44.61
	Sensor ultrasónico HCSR04	1	2.00	2.00
	Motor GA25-370 130rpm (agitador)	1	20.00	20.00
	Motor Pololu 100rpm (acople del eje)	1	7.95	7.95
	Convertidor DC-DC LM2596	3	3.00	9.00
	Puente H L298N	1	4.33	4.33
	Mini puente H L298N	1	1.82	1.82
	Bomba de agua R385 12V	1	8.00	8.00
	Micro servomotor Sg90 5V	2	2.80	5.60
	Relé de estado sólido SSR 40da	1	17.00	17.00
	Fuente DC 3.3V MB102	1	2.75	2.75
Otros (cables, resistencias, opamps, reguladores)		15.00	15.00	
<b>Gastos</b>	Mano de obra	1	400.00	400.00
<b>Varios</b>	Instalación y puesta en marcha	1	50.00	50.00
<b>Costo Total</b>				<b>1080.26</b>

# Capítulo 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

- Se diseñó un sistema electromagnético basado en electroimanes de núcleos de acero A36. Se demostró mediante cálculos cómo el alto porcentaje de hierro de este material ayuda a maximizar el campo magnético generado por las bobinas. Luego de evaluar distintas configuraciones, se construyó un arreglo de 3 electroimanes de 5cm de radio. Teóricamente, este arreglo es capaz de generar un campo magnético de hasta 0.2T a una altura de 10cm, dentro del área delimitada por un recipiente de 16cm de diámetro. En la práctica, fue posible acelerar la decantación de partículas de hierro y retenerlas mientras el líquido es descargado. A diferencia de otros experimentos, esto se realizó en un recipiente de mayor volumen, demostrando además la escalabilidad de esta técnica.
- Se diseñó un sistema mecatrónico capaz de controlar de forma automática las variables que participan en los procesos de hidrólisis y fermentación. Se obtuvieron resultados favorables al mantener una temperatura constante con un error inferior a 1°C. La velocidad de agitación también se estabilizó alrededor de un valor deseado. Además, se mantuvo el pH en un valor deseado, con fluctuaciones menores a 0.5 unidades. No obstante, todos los resultados provinieron de pruebas aisladas de cada subsistema trabajando independientemente. Es decir, no se realizaron experimentos con todas las variables siendo controladas simultáneamente.
- Se desarrolló una interfaz destinada a permitir al usuario interactuar con el proceso controlado. Se logró leer la información de los sensores, mostrando gráficas en función del tiempo para todas las variables. Además, se estableció la comunicación entre esta y el controlador del proceso, permitiendo ajustar los valores deseados de cualquiera de las tres variables. Adicionalmente, es posible activar actuadores como los electroimanes, ventiladores y bomba de descarga directamente desde esta pantalla.

## 4.2 Recomendaciones

- Aplicar funciones de la librería FreeRTOS para crear un sistema multitareas capaz de controlar todas las variables del sistema de forma recurrente.
- Realizar experimentaciones empleando los sistemas inmovilizados reales, a fin de identificar la eficiencia del dispositivo en la retención de estas partículas, y la viabilidad de su reúso en varios ciclos de producción consecutivos.
- Comparar el desempeño del mecanismo de goteo con el de una bomba peristáltica en el control del pH para determinar la alternativa con mejor relación costo-beneficio.

## REFERENCIAS

- [1] J. F. G. Motta, B. C. B. de FREITAS, A. F. de ALMEIDA, G. A. de S. Martins, y S. V. Borges, "Use of enzymes in the food industry: a review", *Food Science and Technology*, vol. 43, p. e106222, mar. 2023, doi: 10.1590/FST.106222.
- [2] L. A. de Oliveira, J. H. de Miranda, y R. A. C. Cooke, "Water management for sugarcane and corn under future climate scenarios in Brazil", *Agricultural Water Management*, vol. 201, pp. 199–206, mar. 2018, doi: 10.1016/J.AGWAT.2018.01.019.
- [3] Superpilopi, "Los secretos de los alimentos fermentados", Superpilopi. Consultado: el 14 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://superpilopi.com/los-secretos-de-los-alimentos-fermentados/>
- [4] V. Ahuja, A. Arora, S. Chauhan, S. Thakur, C. Jeyaseelan, y D. Paul, "Yeast-Mediated Biomass Valorization for Biofuel Production: A Literature Review", *Fermentation 2023, Vol. 9, Page 784*, vol. 9, núm. 9, p. 784, ago. 2023, doi: 10.3390/FERMENTATION9090784.
- [5] S. A. Ansari y Q. Husain, "Potential applications of enzymes immobilized on/in nano materials: A review", *Biotechnology Advances*, vol. 30, núm. 3, pp. 512–523, may 2012, doi: 10.1016/J.BIOTECHADV.2011.09.005.
- [6] S. Palacios-Ponce *et al.*, "Trichoderma sp. spores and Kluyveromyces marxianus cells magnetic separation: Immobilization on chitosan-coated magnetic nanoparticles", *Preparative biochemistry & biotechnology*, vol. 47, núm. 6, pp. 554–561, jul. 2017, doi: 10.1080/10826068.2016.1275007.
- [7] M. Sardar, M. Perwez, R. Ahmad, J. Mukherjee, y M. Gupta, "Immobilization of Enzymes on Magnetic Nanoparticles", pp. 1–30, 2018, Consultado: el 14 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/345308382\\_Immobilization\\_of\\_Enzymes\\_on\\_Magnetic\\_Nanoparticles](https://www.researchgate.net/publication/345308382_Immobilization_of_Enzymes_on_Magnetic_Nanoparticles)
- [8] M. Seifan, A. K. Sarmah, A. K. Samani, A. Ebrahiminezhad, Y. Ghasemi, y A. Berenjian, "Mechanical properties of bio self-healing concrete containing immobilized bacteria with iron oxide nanoparticles", *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 102, núm. 10, pp. 4489–4498, may 2018, doi: 10.1007/S00253-018-8913-9.

- [9] A. Ilyina *et al.*, “Magnetic separation of nanobiostructured systems for innovation of biocatalytic processes in food industry”, *Novel Approaches of Nanotechnology in Food*, pp. 67–96, ene. 2016, doi: 10.1016/B978-0-12-804308-0.00003-0.
- [10] D. Kishore, S. Kundu, y A. M. Kayastha, “Thermal, Chemical and pH Induced Denaturation of a Multimeric  $\beta$ -Galactosidase Reveals Multiple Unfolding Pathways”, *PLoS ONE*, vol. 7, núm. 11, nov. 2012, doi: 10.1371/JOURNAL.PONE.0050380.
- [11] T. F. Pio, L. P. Fraga, y G. A. Macedo, “Inoculum padronization for the production of cutinase by *Fusarium oxysporum*”, *Brazilian Journal of Microbiology*, vol. 39, núm. 1, pp. 74–77, ene. 2008, doi: 10.1590/S1517-83822008000100018.
- [12] N. K. Leeuwendaal, C. Stanton, P. W. O’toole, y T. P. Beresford, “Fermented Foods, Health and the Gut Microbiome”, *Nutrients 2022, Vol. 14, Page 1527*, vol. 14, núm. 7, p. 1527, abr. 2022, doi: 10.3390/NU14071527.
- [13] Research and Markets, “Microbial Fermentation Technology Market Size, Share & Trends Analysis Report By Application (Antibiotics, Vaccines), By End-user (Biopharmaceutical Companies), By Region, And Segment Forecasts, 2023 - 2030”, mar. 2023. Consultado: el 14 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://www.researchandmarkets.com/report/microbial-fermentation?utm\\_source=GNE&utm\\_medium=PressRelease&utm\\_code=gb6tps&utm\\_campaign=1843691+-+Global+Microbial+Fermentation+Technology+Market+Report+2023%3a+Sector+to+Reach+%2449.39+Billion+by+2030+at+a+CAGR+of+5.8%25&utm\\_exec=jamu273prd](https://www.researchandmarkets.com/report/microbial-fermentation?utm_source=GNE&utm_medium=PressRelease&utm_code=gb6tps&utm_campaign=1843691+-+Global+Microbial+Fermentation+Technology+Market+Report+2023%3a+Sector+to+Reach+%2449.39+Billion+by+2030+at+a+CAGR+of+5.8%25&utm_exec=jamu273prd)
- [14] N. D. Cerda-Cejudo *et al.*, “Solid-State Fermentation for the Recovery of Phenolic Compounds from Agro-Wastes”, *Resources 2023, Vol. 12, Page 36*, vol. 12, núm. 3, p. 36, mar. 2023, doi: 10.3390/RESOURCES12030036.
- [15] I. Pajčin *et al.*, “Effect of different inoculum preparation conditions on the biomass growth and antimicrobial activity of *Bacillus sp.*”, *Journal on Processing and Energy in Agriculture*, vol. 23, núm. 2, pp. 96–100, 2019, doi: 10.5937/JPEA1902096P.

- [16] J. Arnau, D. Yaver, y C. M. Hjort, “Strategies and Challenges for the Development of Industrial Enzymes Using Fungal Cell Factories”, *Grand Challenges in Biology and Biotechnology*, pp. 179–210, 2020, doi: 10.1007/978-3-030-29541-7\_7/FIGURES/7.
- [17] Makets&Markets, “Global Enzymes Market by Product Type (Industrial enzymes and Specialty Enzymes), Source (Microorganism, Plant, and Animal), Type, Industrial Enzyme Application, Specialty Enzymes Application and Region - Forecast to 2027”, Research and Markets. Consultado: el 29 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://www.researchandmarkets.com/reports/5009185/global-enzymes-market-by-product-type?utm\\_source=GNOM&utm\\_medium=PressRelease&utm\\_code=bzf3gm&utm\\_campaign=1768098+-+Global+Enzymes+Market+Report+\(2022+to+2027\)+-+Advancements+in+Enzyme+Engineering+%26+Green+Chemistry+is+Driving+Growth&utm\\_exec=jamu273prd](https://www.researchandmarkets.com/reports/5009185/global-enzymes-market-by-product-type?utm_source=GNOM&utm_medium=PressRelease&utm_code=bzf3gm&utm_campaign=1768098+-+Global+Enzymes+Market+Report+(2022+to+2027)+-+Advancements+in+Enzyme+Engineering+%26+Green+Chemistry+is+Driving+Growth&utm_exec=jamu273prd)
- [18] L. P. Christopher, Hemanathan Kumar, y V. P. Zambare, “Enzymatic biodiesel: Challenges and opportunities”, *Applied Energy*, vol. 119, pp. 497–520, abr. 2014, doi: 10.1016/J.APENERGY.2014.01.017.
- [19] P. Wolski *et al.*, “Factors that influence the activity of biomass-degrading enzymes in the presence of ionic liquids—a review”, *Frontiers in Energy Research*, vol. 11, p. 1212719, ago. 2023, doi: 10.3389/FENRG.2023.1212719/BIBTEX.
- [20] JIRCAS, “557. Development of Enzyme-Free Microbial Saccharification Technology to Efficiently and Inexpensively Obtain Glucose from Biomass for the Production of Biofuels and Biochemicals | Japan International Research Center for Agricultural Sciences | JIRCAS”, Japan International Research Center for Agricultural Sciences. Consultado: el 14 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.jircas.go.jp/en/program/proc/blog/20220614>
- [21] P. F. Stanbury, A. Whitaker, y S. J. Hall, “The recovery and purification of fermentation products”, *Principles of Fermentation Technology*, pp. 619–686, ene. 2017, doi: 10.1016/B978-0-08-099953-1.00010-7.

- [22] M. Bilal *et al.*, “Engineering magnetic nanobiocatalytic systems with multipurpose functionalities for biocatalysis, biotechnology and bioprocess applications”, *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, vol. 30, p. 100866, dic. 2022, doi: 10.1016/J.SCP.2022.100866.
- [23] V. Sóti, S. Lenaerts, y I. Cornet, “Of enzyme use in cost-effective high solid simultaneous saccharification and fermentation processes”, *Journal of Biotechnology*, vol. 270, pp. 70–76, mar. 2018, doi: 10.1016/J.JBIOTEC.2018.01.020.
- [24] V. G. Matveeva y L. M. Bronstein, “Magnetic Nanoparticle-Containing Supports as Carriers of Immobilized Enzymes: Key Factors Influencing the Biocatalyst Performance”, *Nanomaterials*, vol. 11, núm. 9, sep. 2021, doi: 10.3390/NANO11092257.
- [25] A. Warghane *et al.*, “Value-addition in citrus processing industry waste through enzyme technology”, en *Value-Addition in Agri-Food Industry Waste through Enzyme Technology*, 2023. doi: 10.1016/B978-0-323-89928-4.00024-9.
- [26] Y. Ma, S. Liu, Y. Wang, y Y. Wang, “Direct utilization of lipid and starch from wet microalgae (*Chlorella vulgaris*)”, en *Algal Biotechnology: Integrated Algal Engineering for Bioenergy, Bioremediation, and Biomedical Applications*, 2022. doi: 10.1016/B978-0-323-90476-6.00018-2.
- [27] P. Beltrán, “Las 30 principales enzimas celulares (y sus funciones)”, Médico+. Consultado: el 14 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://medicoplus.com/medicina-general/principales-enzimas-celulares>
- [28] Covoji, “What is Yeast? | Covoji Learning”, Covoji Learning. Consultado: el 14 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://learning.covoji.com/curious-world/what-is-yeast/#google\\_vignette](https://learning.covoji.com/curious-world/what-is-yeast/#google_vignette)
- [29] L. Han, J. Feng, S. Zhang, Z. Ma, Y. Wang, y X. Zhang, “Alkali pretreated of wheat straw and its enzymatic hydrolysis”, *Brazilian Journal of Microbiology*, vol. 43, núm. 1, pp. 53–61, ene. 2012, doi: 10.1590/S1517-83822012000100006.
- [30] Micet, “What should be the temperature of the fermenter? - Micet Craft”, Micet Craft. Consultado: el 6 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.micetcraft.com/what-should-be-the-temperature-of-the-fermenter/>
- [31] S. Rollero, S. Roberts, F. F. Bauer, y B. Divol, “Agitation impacts fermentation performance as well as carbon and nitrogen metabolism in *Saccharomyces*

- cerevisiae under winemaking conditions”, *Australian Journal of Grape and Wine Research*, vol. 24, núm. 3, pp. 360–367, jul. 2018, doi: 10.1111/AJGW.12338.
- [32] Y. Zhou *et al.*, “Effects of Agitation, Aeration and Temperature on Production of a Novel Glycoprotein GP-1 by *Streptomyces kanasensis* ZX01 and Scale-Up Based on Volumetric Oxygen Transfer Coefficient”, *Molecules: A Journal of Synthetic Chemistry and Natural Product Chemistry*, vol. 23, núm. 1, 2018, doi: 10.3390/MOLECULES23010125.
- [33] CAERT, “pH and Fermentation”, E-unit. Consultado: el 6 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: [http://agriculturewithmrsskien.weebly.com/uploads/2/1/3/2/21329554/ph\\_and\\_fermentation.pdf](http://agriculturewithmrsskien.weebly.com/uploads/2/1/3/2/21329554/ph_and_fermentation.pdf)
- [34] P. Komáromy *et al.*, “Optimized pH and Its Control Strategy Lead to Enhanced Itaconic Acid Fermentation by *Aspergillus terreus* on Glucose Substrate”, *Fermentation 2019, Vol. 5, Page 31*, vol. 5, núm. 2, p. 31, abr. 2019, doi: 10.3390/FERMENTATION5020031.
- [35] A. Hernández, M. Ramírez, A. Arízaga, Ó. Flores, y H. Ignacio, “Medición en línea de pH, Temperatura y Agitación de medio de cultivo en fermentación utilizando *Saccharomyces cerevisiae*.”, *ECORFAN*, pp. 162–171, sep. 2014, Consultado: el 6 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:262261247>
- [36] Z. H. Yang, Y. M. Chu, y W. Zhang, “Accurate approximations for the complete elliptic integral of the second kind”, *J Math Anal Appl*, vol. 438, núm. 2, 2016, doi: 10.1016/j.jmaa.2016.02.035.
- [37] D. C. ; Upadhyay, M. Goyal, y J. P. Goel, *Physics*. SBPD Publications, 2016. Consultado: el 14 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.google.com.ec/books/edition/Physics/UxK8DQAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=0>
- [38] R. Lohani, *Elements Of Physics For Class XII*. BFC Publications, 2023. Consultado: el 14 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://www.google.com.ec/books/edition/Elements\\_Of\\_Physics\\_For\\_Class\\_XI/ym-9EAAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=0](https://www.google.com.ec/books/edition/Elements_Of_Physics_For_Class_XI/ym-9EAAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=0)
- [39] Engineering 4all, “CHAPTER 3 PRINCIPLES OF ALTERNATING AND ROTATING MAGNETIC FIELDS”, Engineering Photos, Videos and Articals

- (Engineering Search Engine). Consultado: el 6 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://emadrlc.blogspot.com/2012/12/chapter-3-principles-of-alternating-and.html>
- [40] V. Marghussian, “4 - Magnetic Properties of Nano-Glass Ceramics”, en *Nano-Glass Ceramics*, V. Marghussian, Ed., Oxford: William Andrew Publishing, 2015, pp. 181–223. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-35386-1.00004-9>.
- [41] M. Hu, H. J. Butt, K. Landfester, M. B. Bannwarth, S. Wooh, y H. Thérien-Aubin, “Shaping the Assembly of Superparamagnetic Nanoparticles”, *ACS Nano*, vol. 13, núm. 3, 2019, doi: [10.1021/acsnano.8b07783](https://doi.org/10.1021/acsnano.8b07783).
- [42] A. Alasli, L. Çetin, N. Akçura, A. Kahveci, F. C. Can, y Ö. Tamer, “Electromagnet design for untethered actuation system mounted on robotic manipulator”, *Sens Actuators A Phys*, vol. 285, pp. 550–565, ene. 2019, doi: [10.1016/j.sna.2018.11.027](https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.11.027).
- [43] Ministerio de Industrias y Productividad, “RTE-131”, Guayaquil, 2014.
- [44] Asociación Española de Normalización, “UNE-EN 1672-2”, Unión Europea, 2021.
- [45] Labcompare, “Laboratory Bioreactors And Fermenters”, Labcompare. Consultado: el 6 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.labcompare.com/General-Laboratory-Equipment/25007-Laboratory-Bioreactors-and-Fermenters/>
- [46] K. Khoshnevisan, E. Poorakbar, H. Baharifar, y M. Barkhi, “Recent Advances of Cellulase Immobilization onto Magnetic Nanoparticles: An Update Review”, *Magnetochemistry 2019, Vol. 5, Page 36*, vol. 5, núm. 2, p. 36, jun. 2019, doi: [10.3390/MAGNETOCHEMISTRY5020036](https://doi.org/10.3390/MAGNETOCHEMISTRY5020036).
- [47] A. Moghanizadeh, F. Ashrafizadeh, J. Varshosaz, y A. Ferreira, “Study the effect of static magnetic field intensity on drug delivery by magnetic nanoparticles”, *Scientific Reports 2021 11:1*, vol. 11, núm. 1, pp. 1–13, sep. 2021, doi: [10.1038/s41598-021-97499-7](https://doi.org/10.1038/s41598-021-97499-7).
- [48] C. D. Powell *et al.*, “Magnetic nanoparticle recovery device (MagNERD) enables application of iron oxide nanoparticles for water treatment”, *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 22, núm. 2, pp. 1–11, ene. 2020, doi: [10.1007/S11051-020-4770-4/FIGURES/7](https://doi.org/10.1007/S11051-020-4770-4/FIGURES/7).

- [49] Iowa State University, “Nondestructive Evaluation Physics : Materials”, Physics of Nondestructive Evaluation. Consultado: el 4 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://www.nde-ed.org/Physics/Materials/Physical\\_Chemical/Electrical.xhtml](https://www.nde-ed.org/Physics/Materials/Physical_Chemical/Electrical.xhtml)
- [50] Megamaxi, “Lechero De Aluminio UMCO 3 Litros”, Catálogo de Productos Megamaxi. Consultado: el 4 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.megamaxi.com/shop/hogar/utensilios-de-cocina-6591/ollas-cacerolas-y-peroles-6592/lechero-de-aluminio-umco-3-litros/>
- [51] Team\_Xometry, “All About PETG 3D Printing Filament: Materials, Properties, Definition”, Xometry. Consultado: el 3 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/petg-3d-printing-filament/>
- [52] Grupo\_Velasco, “FUENTE DE PODER CONMUTADA 12V 30A”, Velasco | Sonido y Electrónica. Consultado: el 3 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://www.velasco.com.ec/velasco/producto.php?id=3627>
- [53] “ESP32s Board con wifi bluetooth (ESP-WROOM-32) - DynamoElectronics”. Consultado: el 3 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.dynamoelectronics.com/tienda/esp32s-board-desarrollo-con-wifi-bluetooth/>
- [54] EMTEL, “Emtel 23 AWG - 1 lb (630 feet)”, Enameled Wire & Cable Co. Consultado: el 3 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://www.amazon.com/-/es/Emtel-14-AWG-transformador-electrocultural/dp/B08QGBQM8P/ref=pd\\_ci\\_mcx\\_mh\\_mcx\\_views\\_0?pd\\_rd\\_w=LzuBl&content-id=amzn1.sym.225b4624-972d-4629-9040-f1bf9923dd95%3Aamzn1.symc.40e6a10e-cbc4-4fa5-81e3-4435ff64d03b&pf\\_rd\\_p=225b4624-972d-4629-9040-f1bf9923dd95&pf\\_rd\\_r=MHG5J19RGKQ0XGF8C2DD&pd\\_rd\\_wg=nQJRN&pd\\_rd\\_r=2d0929ec-0520-41b8-9ffb-ee0408ad6893&pd\\_rd\\_i=B0BM7NFFP3&th=1](https://www.amazon.com/-/es/Emtel-14-AWG-transformador-electrocultural/dp/B08QGBQM8P/ref=pd_ci_mcx_mh_mcx_views_0?pd_rd_w=LzuBl&content-id=amzn1.sym.225b4624-972d-4629-9040-f1bf9923dd95%3Aamzn1.symc.40e6a10e-cbc4-4fa5-81e3-4435ff64d03b&pf_rd_p=225b4624-972d-4629-9040-f1bf9923dd95&pf_rd_r=MHG5J19RGKQ0XGF8C2DD&pd_rd_wg=nQJRN&pd_rd_r=2d0929ec-0520-41b8-9ffb-ee0408ad6893&pd_rd_i=B0BM7NFFP3&th=1)
- [55] DIPAC, “Planchas Laminadas en Caliente”, Catálogo de Productos DIPAC. Consultado: el 3 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://dipacmanta.com/producto/planchas/planchas-acero-negro/planchas-laminadas-en-caliente/>

- [56] Naylamps, "Sensor Ultrasonido HC-SR04", Naylamp Mechatronics SAC. Consultado: el 22 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://naylampmechatronics.com/sensores-proximidad/10-sensor-ultrasonido-hc-sr04.html>
- [57] GAOHOU, "GAOHOU 2 PCS DS18B20 Waterproof Digital Temperature Sensor with Adapter Module for Arduino: Amazon.com: Industrial & Scientific", Amazon.com. Consultado: el 6 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://www.amazon.com/-/es/GAOHOU-DS18B20-temperatura-impermeable-adaptador/dp/B07YS9CKL6/ref=sr\\_1\\_2?\\_\\_mk\\_es\\_US=%C3%85M%C3%85C5%BD%C3%95%C3%91&crd=1T0KAWJRSK6XC&keywords=liquid+temperature+sensor+arduino&qid=1698262805&sprexif=liquid+temperature+sensor+arudin%2Caps%2C206&sr=8-2](https://www.amazon.com/-/es/GAOHOU-DS18B20-temperatura-impermeable-adaptador/dp/B07YS9CKL6/ref=sr_1_2?__mk_es_US=%C3%85M%C3%85C5%BD%C3%95%C3%91&crd=1T0KAWJRSK6XC&keywords=liquid+temperature+sensor+arduino&qid=1698262805&sprexif=liquid+temperature+sensor+arudin%2Caps%2C206&sr=8-2)
- [58] GAOHOU, "GAOHOU PH0-14 Value Detect Sensor Module + PH Electrode Probe BNC For Arduino: Industrial & Scientific", Amazon.com. Consultado: el 7 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://www.amazon.com/GAOHOU-PH0-14-Detect-Electrode-Arduino/dp/B0799BXMVJ/ref=sr\\_1\\_4?crd=203C3LMZZLXRN&keywords=ph+sensor+arduino&qid=1698295893&sprexif=ph+sensor+%2Caps%2C255&sr=8-4](https://www.amazon.com/GAOHOU-PH0-14-Detect-Electrode-Arduino/dp/B0799BXMVJ/ref=sr_1_4?crd=203C3LMZZLXRN&keywords=ph+sensor+arduino&qid=1698295893&sprexif=ph+sensor+%2Caps%2C255&sr=8-4)
- [59] Walfront Store, "25GA-370 DC 12V Micro Gear Box Motor Speed Reduction Geared Motor for Electronic Lock(5RPM)", Amazon.com. Consultado: el 7 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://www.amazon.com/25GA-370-Micro-Reduction-Geared-Electronic/dp/B07JWBSF6B/ref=sr\\_1\\_4?keywords=25ga-370&qid=1702052814&sr=8-4&th=1](https://www.amazon.com/25GA-370-Micro-Reduction-Geared-Electronic/dp/B07JWBSF6B/ref=sr_1_4?keywords=25ga-370&qid=1702052814&sr=8-4&th=1)
- [60] Robotics Ecuador, "MOTOR 25GA-370 CON ENCODER 12V 60RPM", Robotics - Electrónica y Robótica. Consultado: el 22 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://roboticsec.com/producto/motor-25ga-370-con-encoder-12v-60rpm/>
- [61] "ESP32 display-4.3 Inch HMI Display 480x272 RGB TFT LCD Touch Screen Compatible with Arduino/LVGL". Consultado: el 22 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.elecrow.com/esp32-display-4-3-inch-hmi-display-rgb-tft-lcd-touch-screen.html>

- [62] Arduino, "Gravity: Analog CO2 Gas Sensor (MG-811 Sensor) — Arduino Official Store", Arduino Store. Consultado: el 22 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://store.arduino.cc/products/gravity-analog-co2-gas-sensor-mg-811-sensor>
- [63] Arduino, "Grove - Gas Sensor (O2) — Arduino Official Store", Arduino Store. Consultado: el 22 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://store.arduino.cc/products/grove-gas-sensor-o2?queryID=undefined&\\_gl=1\\*sdmegp\\*\\_ga\\*NDIyMzU1NDYyLjE3MDE4MTc0MDY.\\*\\_ga\\_NEXN8H46L5\\*MTcwMzgyMzczOC4yNy4xLjE3MDM4MjM3NzkuMC4wLjA.\\*\\_fplc\\*Nk5MQ1IIMkY6NGRBd0swakNuOFJBWfQ3djZMT0lrRyUyQjJoTkVBdWRZJTJGRkxrS1hDTThQajNVRFIJdGN0d080RGZ0aVdNJTJGcDFqSkZTMXpONIRQSWNMbGtPT3BDT1dIYVBjMVFMhFa21ma2xHc0VuM3VPRlQ4QjVpSnllcUdrV2clM0QIM0Q](https://store.arduino.cc/products/grove-gas-sensor-o2?queryID=undefined&_gl=1*sdmegp*_ga*NDIyMzU1NDYyLjE3MDE4MTc0MDY.*_ga_NEXN8H46L5*MTcwMzgyMzczOC4yNy4xLjE3MDM4MjM3NzkuMC4wLjA.*_fplc*Nk5MQ1IIMkY6NGRBd0swakNuOFJBWfQ3djZMT0lrRyUyQjJoTkVBdWRZJTJGRkxrS1hDTThQajNVRFIJdGN0d080RGZ0aVdNJTJGcDFqSkZTMXpONIRQSWNMbGtPT3BDT1dIYVBjMVFMhFa21ma2xHc0VuM3VPRlQ4QjVpSnllcUdrV2clM0QIM0Q).
- [64] T. Giordani, T. R. Clarke, C. E. F. Kwietniewski, M. A. Aronov, N. I. Kobasko, y G. E. Totten, "Mechanical and metallurgical evaluation of carburized, conventionally and intensively quenched steels", *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 22, núm. 8, pp. 2304–2313, ago. 2013, doi: 10.1007/S11665-013-0522-2.
- [65] L. Zhou, C. Davis, y P. Kok, "Steel microstructure – Magnetic permeability modelling: The effect of ferrite grain size and phase fraction", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 519, p. 167439, feb. 2021, doi: 10.1016/J.JMMM.2020.167439.
- [66] J. Reyna, "Cálculo de Potencia/agitador Rushton. ITESM CCM", *Materia y Energía*. Consultado: el 14 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=g4LALwvn8KA>
- [67] A. Díaz, "Curvas de potencia para fluidos No-Newtonianos y Newtonianos", Universidad de Los Andes, Bogotá, 2017. Consultado: el 22 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/98a2d337-3b9c-47f7-aa72-8cbaa784b247/content>

# APÉNDICES

## **APÉNDICE A**

## Selección de materiales del electroimán

### 1. Selección de calibre.

Para los cálculos desarrollados se utilizaron las propiedades del cable esmaltado de la marca EMTEL. Cada calibre posee una resistencia eléctrica por unidad de longitud diferente. En consecuencia, si se desea generar la misma corriente para diferentes calibres, el voltaje aplicado a la bobina variará en función de las características del cable.

$$R = f(AWG)$$

$$V = I * R$$

La siguiente tabla muestra los diferentes voltajes que deben aplicarse a cada bobina en función del calibre, para poder generar la corriente deseada en los tres escenarios evaluados. Recordando la limitante de 12V, y procurando utilizar el calibre más delgado, para generar el mayor número de vueltas posible manteniendo el peso, se seleccionaron los calibres 18, 20, y 23, para cada arreglo.

**Tabla A. 1**

*Resultados cálculo de voltaje por calibre*

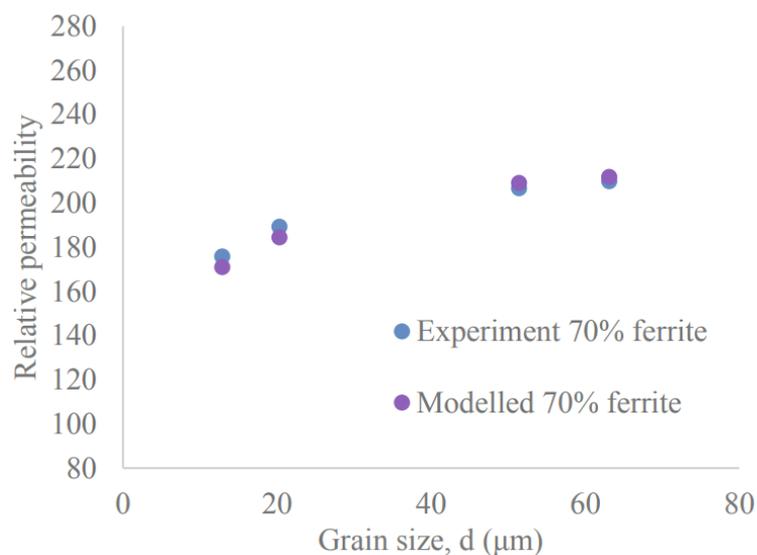
Calibre AWG	Corriente Máxima [A]	2 bobinas	3 bobinas	6 bobinas
		Voltaje [V] 15A – 0.5lb	Voltaje [V] 10A – 0.33lb	Voltaje [V] 5A – 0.17lb
25	6	242.70	107.87	26.97
24	7	154.95	68.87	17.22
23	8	96.18	42.74	10.69
22	9	61.10	27.16	6.79
21	10.5	38.39	17.06	4.27
20	12	24.35	10.82	2.71
19	14	15.70	6.98	1.74
18	16	9.57	4.26	1.06
17	18	6.08	2.70	0.68
16	20	3.91	1.74	0.43

## 2. Selección material del núcleo ferromagnético

El núcleo ferromagnético permite concentrar las líneas del campo magnético, intensificándolo en la región superior (axial) a la bobina. Este efecto mejora conforme aumenta la permeabilidad magnética del núcleo. Esta característica depende principalmente del porcentaje de hierro puro del material. No obstante, la baja disponibilidad local y la fragilidad del hierro representan desventajas para el uso de este material. Debido a esto, se optó por el acero de bajo carbono, específicamente el ASTM A36. Este es uno de los aceros con menor porcentaje de impurezas. Sin embargo, no fue posible conocer su permeabilidad magnética real, dado que esta varía en función de diversas variables durante su proceso de producción. Entre estas influye el tamaño del grano. Tomando como referencia estudios de materiales, se asumió un tamaño de grano común de aproximadamente  $20\mu\text{m}$  [64]. Con esta información, se aproximó la permeabilidad magnética a 200 unidades, según la siguiente gráfica de un estudio realizado en base a un acero con un porcentaje de carbono similar [65].

**Figura A. 1**

*Permeabilidad magnética relativa en función del tamaño del grano del acero [65].*



## **APÉNDICE B**

## Cálculo de la potencia disipada en la resistencia de calentamiento

El sistema de control de temperatura utiliza como actuador una resistencia blindada que se coloca alrededor del recipiente principal. Las dimensiones de esta resistencia fueron dadas por el fabricante en función de la potencia disipada requerida. Para conocer este valor se toman en consideración parámetros iniciales:

Masa del líquido	$m = 2500 \text{ gr}$
Calor específico del líquido	$c_p = 1 \frac{\text{cal}}{\text{gr}^\circ\text{C}}$
Temperatura inicial	$T_i = 25^\circ\text{C}$
Temperatura final	$T_f = 50^\circ\text{C}$
Tiempo de calentamiento	$\Delta t = 5 \text{ min} = 0.0833 \text{ hr}$

Dado que la resistencia se encuentra directamente en contacto con el recipiente, se asume que el calentamiento se da únicamente por efecto de la conducción térmica. Por lo tanto, se calcula el calor transferido ( $Q$ ) al sistema para lograr el cambio de temperatura deseado.

$$Q = m c_p (T_f - T_i)$$
$$Q = 2500 * 1 * (50 - 25)$$
$$Q = 62500 \text{ cal} = 247.5 \text{ BTU}$$

Considerando el tiempo en que se espera que suceda el cambio de temperatura, se calcula la potencia ( $P$ ) necesaria en la resistencia

$$P = \frac{Q}{\Delta t}$$
$$P = \frac{247.5}{0.0833} = 2970 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}}$$
$$P = 870.97 \text{ W}$$

Se decidió solicitar una resistencia capaz de disipar una potencia 1 kW. De esta forma, se consideran las posibles pérdidas de energía durante la transferencia de calor, al no tratarse de un sistema aislado.

## APÉNDICE C

## Cálculo de la potencia del motor de agitación [66]

Se asumió que el líquido del tanque de fermentación posee una viscosidad y densidad muy similar a la del agua. Adicionalmente, se consideró velocidad de agitación máxima deseada, y las dimensiones del tanque. De esta forma se poseen los siguientes datos iniciales.

Densidad	$\rho = 1000 \frac{kg}{m^3}$
Viscosidad dinámica	$\mu = \mu_{H_2O} = 1 * 10^{-3} \frac{kg}{m*s}$
Velocidad de agitación	$N_i = 100rpm = 1.667 \frac{rev}{s}$
Diámetro del agitador	$D_i = 0.1 m$
Diámetro del recipiente	$D_T = 0.16 m$

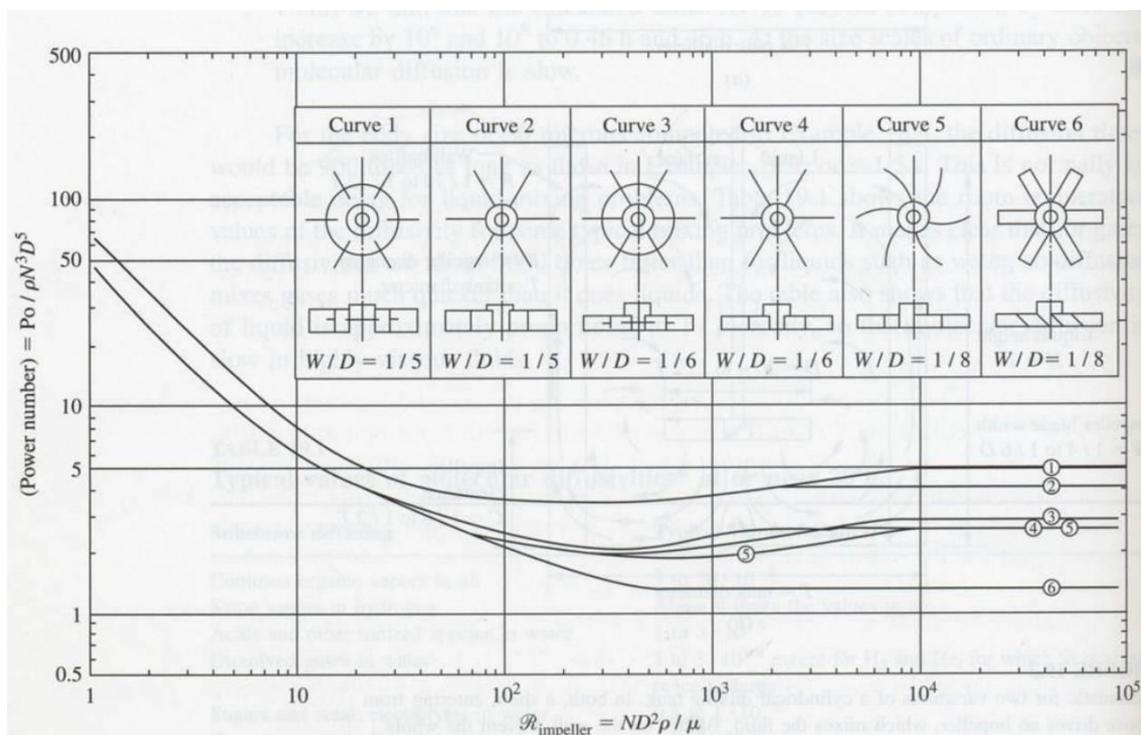
En función de esto, se determina el número de Reynolds del fluido, clasificándolo como laminar.

$$R_e = \frac{\rho N_i D_i^2}{\mu} \quad (A. 1)$$
$$R_e = \frac{1000 * 1.667 * 0.1^2}{1 * 10^{-3}}$$
$$R_e = 16670$$

Con este valor, se selecciona el número de potencia ( $N_p$ ) correspondiente al tipo de paletas utilizado. Se obtiene el valor de  $N_p = 5$ , tomado de la curva 1, correspondiente al tipo de agitador Rushton. A partir de este, se despeja la potencia mínima necesaria para el motor del agitador.

**Figura A. 2**

Curvas de número de potencia vs número de Reynolds, según tipo de agitador [67]



$$P = N_p \rho N_i^3 D_i^5 \quad (\text{A. 2})$$

$$P = 5 * 1000 * (1.667)^3 (0.1)^5$$

$$P = 0.23 \text{ W}$$

La potencia calculada resultó muy baja, por lo que se decidió seleccionar el motor más pequeño disponible en el mercado, con una reducción de velocidad apropiada (100rpm con carga). Además, se escogió un motor con encoder integrado para permitir el control en lazo cerrado de la velocidad. El sobredimensionamiento en la potencia del motor se consideró apropiado ya que muchos motores de biorreactores poseen capacidades similares a la seleccionada, de manera que se asegure el funcionamiento del dispositivo en casos extremos como por ejemplo al trabajo con fluidos de mayor densidad.

## APÉNDICE D

# Electroimanes

## 1. Construcción de electroimanes

En función de los cálculos realizados se escogió el arreglo de 3 electroimanes de 5cm de radio, con 100 vueltas y 10A en cada bobina. Sin embargo, durante la implementación se notó un calentamiento excesivo en el cable del embobinado debido a la alta potencia. En consecuencia, se decidió reducir la corriente a la tercera parte, y por ende triplicar el número de vueltas, a fin de mantener la misma relación A-vueltas, lo cual garantiza que el campo magnético conserve el comportamiento calculado.

Adicionalmente, se decidió incluir un ventilador para cada bobina, a fin de salvaguardar la integridad del cable esmaltado. Para evitar que el aire del ventilador choque con la base del núcleo, se diseñaron e imprimieron en 3D en PETG unas estructuras de soporte para las bobinas que se ubican entre estas y el ventilador. Su geometría permite redireccionar el flujo de aire hacia el perfil del electroimán, asegurando que el aire circule alrededor del cable. Además, se colocó una pared plástica que rodea a las 3 bobinas para evitar el desvío del aire hacia afuera.

## 2. Experimento de decantación.

Como se mencionó en la sección de resultados, una de las pruebas realizadas consistió en comparar la velocidad con que descienden las partículas de hierro disueltas en la solución de carboximetilcelulosa por gravedad y bajo la acción del campo magnético. A continuación, se muestra toda la secuencia de imágenes cada 10 segundos.

**Figura A. 3**

*Tiempo 0 segundos (izquierda sin electroimán, derecha con electroimán)*



**Figura A. 4**

*Tiempo 10 segundos (izquierda sin electroimán, derecha con electroimán)*



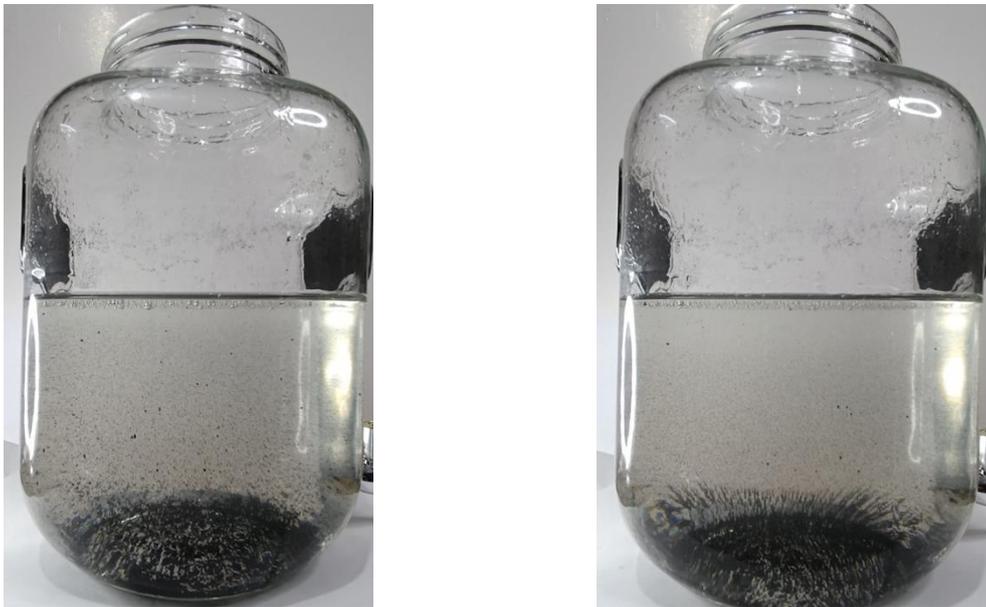
**Figura A. 5**

*Tiempo 20 segundos (izquierda sin electroimán, derecha con electroimán)*



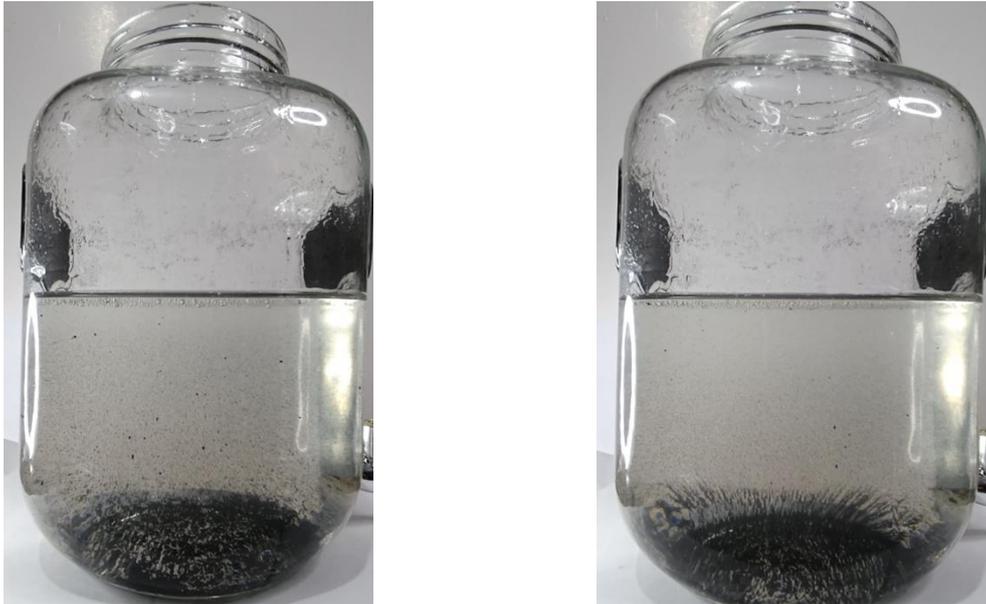
**Figura A. 6**

*Tiempo 30 segundos (izquierda sin electroimán, derecha con electroimán)*



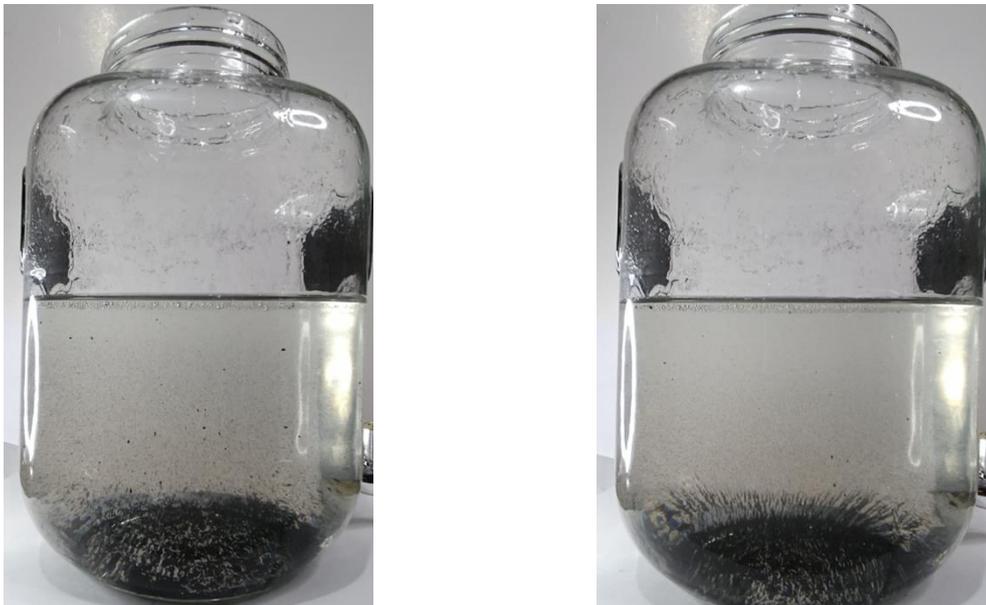
**Figura A. 7**

*Tiempo 40 segundos (izquierda sin electroimán, derecha con electroimán)*



**Figura A. 8**

*Tiempo 50 segundos (izquierda sin electroimán, derecha con electroimán)*



**Figura A. 9**

*Tiempo 60 segundos (izquierda sin electroimán, derecha con electroimán)*



## **APÉNDICE E**

## Preparación de soluciones de pH

Se utilizó ácido clorhídrico líquido con una concentración de 38% para disolverlo en agua destilada. Empleando las proporciones adecuadas se obtuvo una disolución de este compuesto 0.47M. Luego, se utilizó hidróxido de sodio en su presentación sólida, para disolverlo en agua destilada. De esta forma, se preparó una solución 0.5M.

### Figura A. 10

*Preparación de disolución de NaOH 0.5M*



### Figura A. 11

*Preparación de disolución de HCl 0.47M*



## APÉNDICE F

## Códigos de control

### 1. Código de control de temperatura

```
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#define rele 5
#define pinTemp 2
OneWire ourWire(pinTemp);
DallasTemperature sensors(&ourWire);
float P_temp = 4;
float I_temp = 0.002;
float D_temp = 82.5;
int ref_temp = 50;
bool pid_off_t = true;
float pidLimit_t;
float pidOffV_t;
int count_e_t;
float error_t;
float integral_t;
float derivate_t;
float dt_t;
float acum_derivate_t;
float acum_error_t;
int nTemp;
float voltage_t = 0;
float T_t = 5000;
long t0_t;
int stateT = 0;
float temp;
long tdt_t;
void setup() {
  delay(1000);
  Serial.begin(9600);
  sensors.begin(); //Se inicia el sensor
  pinMode(rele, OUTPUT);
  sensors.requestTemperatures(); //Se envía el comando para leer la temperatura
  temp = sensors.getTempCByIndex(0); //Se obtiene la temperatura en °C

  pidOffV_t=5.5*(ref_temp-temp)-6.5;
  if (pidOffV_t>120.0){
    pidOffV_t=120.0;
    pidLimit_t= ref_temp - (23/4+temp);
  }else{
    pidLimit_t=ref_temp - ((ref_temp-temp)/4+temp);
```

```

}
error_t = ref_temp - temp;
tdt_t = millis();
}
void loop() {
sensors.requestTemperatures(); //Se envía el comando para leer la temperatura
temp= sensors.getTempCByIndex(0); //Se obtiene la temperatura en °C
dt_t = millis() - tdt_t;
tdt_t = millis();
derivate_t = ((ref_temp - temp) - error_t)/dt_t*1000;
error_t = ref_temp - temp;
if (error_t < pidLimit_t && pid_off_t) count_e_t++;
if (count_e_t > 10 && pid_off_t){
pid_off_t = false;
count_e_t = 0;
}
if (error_t > pidLimit_t && not pid_off_t) count_e_t++;
if (count_e_t > 10 && not pid_off_t){
pid_off_t = true;
integral_t = 0;
acum_derivate_t = 0;
acum_error_t = 0;
nTemp = 0;
count_e_t = 0;
}
if (pid_off_t){
if (error_t > 0) voltage_t = pidOffV_t;
else voltage_t = 0;
}else {
integral_t += error_t*dt_t/1000;
acum_derivate_t += derivate_t;
acum_error_t += error_t;
nTemp++;
}

if (stateT == 0){
if (not pid_off_t){
derivate_t = acum_derivate_t/(float)nTemp;
error_t = acum_error_t/(float)nTemp + derivate_t*T_t/2000;
acum_derivate_t = 0;
acum_error_t = 0;
nTemp = 0;
voltage_t = P_temp*error_t + I_temp*integral_t + D_temp*derivate_t;
if (voltage_t>120) voltage_t = 120;
if (voltage_t<13.7) { //if <0 normalmente

```

```

    if (voltage_t <= 9) voltage_t = 0;
    else{
        voltage_t =13.7;
    }
}
}
t0_t = millis();
stateT=1;
}else if (stateT == 1){
    Serial.print(millis());
    Serial.print("; V= ");
    Serial.println(voltage_t);
    if (millis()-t0_t >= map(voltage_t, 0, 120, 0, T_t)){
        stateT = 2;
    }else digitalWrite(rele, HIGH);
}else if (stateT == 2){
    digitalWrite(rele, LOW);
    if (millis()-t0_t >= T_t){
        stateT = 0;
    }
}
}
}

```

## 2. Código de control velocidad de agitación

```

#define ENCA 4
#define ENCB 15
#define PWM 5
#define ref 25
#define n_velFilter 50
#define n_voltFilter 25
long pos;
long pos_freeze;
long old_pos;
float vel;
float vels[n_velFilter];
float filtered_vel;
long t0;
bool up;
long dt;
bool firstLoop = true;
float error = ref;
float integral;
float derivative;
float P = 0.1;//.18

```

```

float I = 0;
float D = 0;
float voltage;
float volts[n_voltFilter];
float filtered_voltage;

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  pinMode(ENCA, INPUT);
  pinMode(ENCB, INPUT);
  pinMode(PWM, OUTPUT);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(ENCA), readEncoder, RISING);
}

```

```

void loop() {
  dt = micros() - t0;
  pos_freeze = pos;
  t0 = micros();
  vel = (pos_freeze - old_pos)*60/45.0/12.0*1000000/dt;
  filtered_vel = filter(vel, vels, firstLoop, n_velFilter);
  integral += error*dt/1000000;
  derivative = ((ref - vel) - error)/dt*1000000;
  error = ref - filtered_vel;
  voltage = P*error + I*integral + D*derivative;
  if (voltage>10.6) voltage = 10.6;
  if (voltage<0) voltage = 0;
  analogWrite(PWM, 145);
  if (firstLoop){
    firstLoop = false;
  }
  old_pos = pos_freeze;
  delay(2);
}

```

```

void readEncoder(){
  int b = digitalRead(ENCB);
  if (b > 0){
    pos++;
  }
  else{
    pos--;
  }
}

```

```

float filter(float newValue, float vector[], bool firstLoop, int n_filter){
    float value_acum = 0;
    for(int i=0; i<n_filter-1; i++){
        vector[i]=vector[i+1];
    }
    if (firstLoop){
        for(int i=0; i<n_filter; i++){
            vector[i] = newValue;
        }
    }
    vector[n_filter-1] = newValue;
    float sorted[n_filter];
    for (int i=0; i<n_filter; i++) sorted[i] = vector[i];
    isort(sorted, n_filter);
    float Q1 = sorted[n_filter/4];
    float Q3 = sorted[3*n_filter/4];
    float RI = Q3-Q1;
    int counter=0;
    for(int i=0; i<n_filter; i++){
        if (vector[i] <= Q3+1.5*RI && vector[i] >= Q1-1.5*RI) {
            value_acum += vector[i];
            counter++;
        }
    }
    return value_acum/counter;
}

```

```

void isort(float a[], int n)
{
    for (int i = 1; i < n; ++i)
    {
        float j = a[i];
        int k;
        for (k = i - 1; (k >= 0) && (j < a[k]); k--)
        {
            a[k + 1] = a[k];
        }
        a[k + 1] = j;
    }
}

```

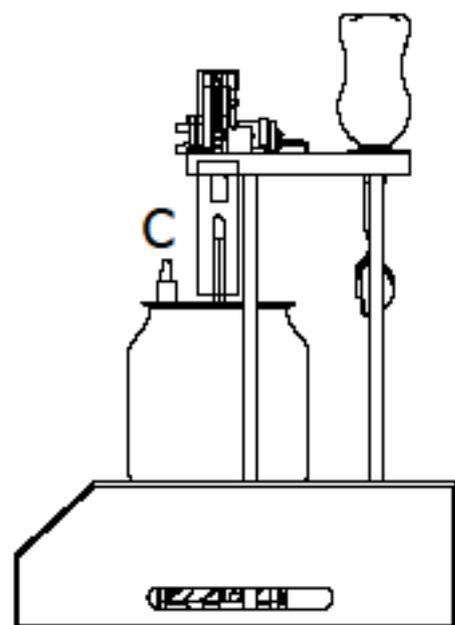
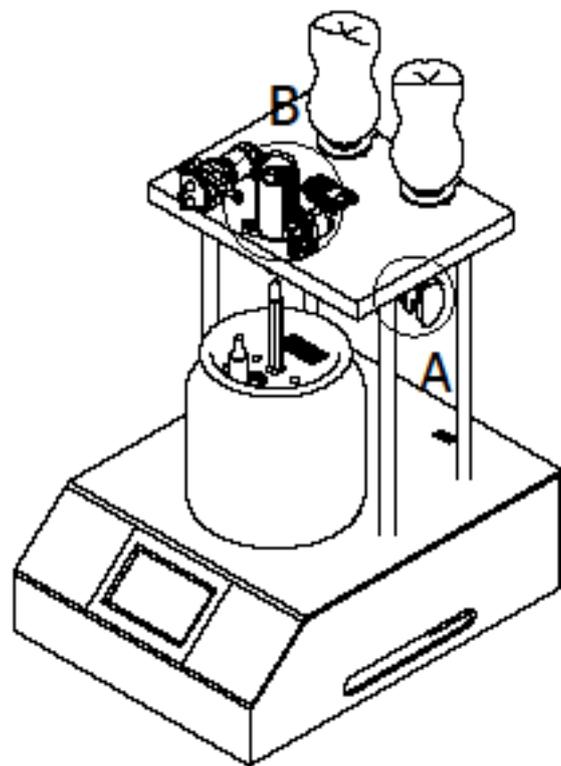
### 3. Código control de pH

```
#include <ESP32Servo.h>
#include <analogWrite.h>
#include <ESP32PWM.h>
#define phPin 34
#define n_phFilter 1000
float Offset = 24.35; //deviation compensate
float m_ph = -6.2;
float phActual;
float filtered_pH;
float pHs[n_phFilter];
Servo servoAcido;
bool flagAcido= true;
int posAcido=0;
Servo servoBase;
bool flagBase= true;
int posBase=0;
float phMin=4.5;
float phMax=5.5;
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  float x=(float)analogRead(phPin)/1000;
  x = 0.013636*x*x*x*x*x - 0.15224*x*x*x*x + 0.59311*x*x*x - 0.98844*x*x + 1.5144*x + 0.093552; //Voltage 3.3V
  float pHValue=(float)x*1.5; //Voltage 5V
  phActual=m_ph*pHValue+Offset; //convert the voltage into pH value
  filtered_pH = filter(phActual, pHs, firstLoopPH, n_phFilter);
  Servo servo;
  servo.attach(17, 500, 2500);
  servoBase.write(35);
  servoBase.attach(19,500,2500);
  servoBase.setPeriodHertz(50);
  servoAcido.write(158);
  servoAcido.attach(18.,500,2500);
  servoAcido.setPeriodHertz(50);
  ESP32PWM::allocateTimer(0);
  ESP32PWM::allocateTimer(1);
  ESP32PWM::allocateTimer(2);
  ESP32PWM::allocateTimer(3);
  delay(60000);
}
void loop(){
  if (filtered_pH>phMax){
    Serial.print(millis());
```

```
Serial.print(";");
Serial.println("A1");
for (posAcido = 158; posAcido >= 0; posAcido -= 1) {
    servoAcido.write(posAcido);
    delay(30);
}
delay(5000);
for (posAcido = 0; posAcido <= 158; posAcido += 1) {
    servoAcido.write(posAcido);
    delay(30);
}
}
if (filtered_pH < pHMin){
    for (posBase = 35; posBase <= 180; posBase += 1) {
        servoBase.write(posBase);
        delay(30);
    }
    delay(5000);
    for (posBase = 180; posBase >= 35; posBase -= 1) {
        servoBase.write(posBase);
        delay(30);
    }
}
delay(15000);
}
}
}
```

## **APÉNDICE G**

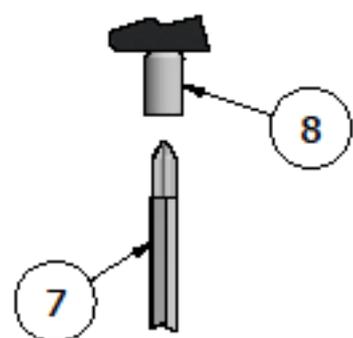
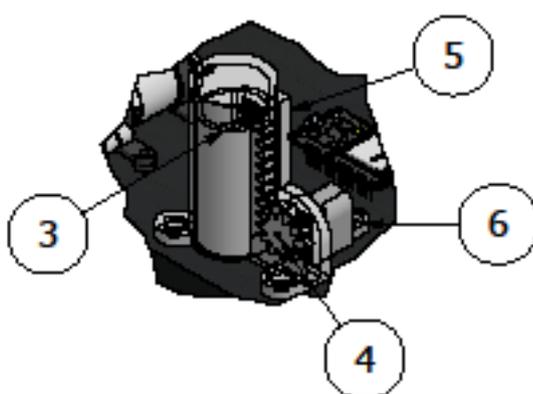
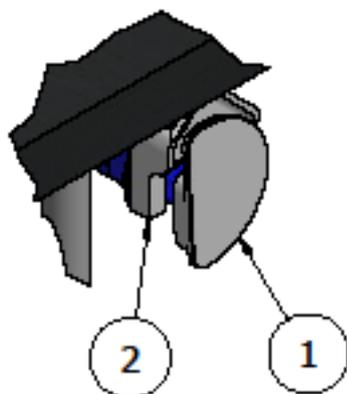
### **Planos Mecánicos**



A (1 : 2)

B (1 : 3)

C (1 : 3)



### Lista de piezas

Número de parte	Cantidad	Nombre
1	2	Leva estranguladora
2	2	Soporte de servomotor
3	1	Cremallera/camisa del motor
4	1	Piñón
5	1	Guarda (piñón-cremallera)
6	1	Guarda (mini-motor)
7	1	Eje del agitador
8	1	Acoplador eje-motor

Dibujado por  
José Jerry Landívar Guartatanga  
Daniela Elizabeth Sánchez Orozco

Cliente  
Arturo Sócrates Palacios Ponce

Fecha  
4/2/2024

Escuela Superior Politécnica del  
Litoral

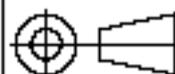
Pieza

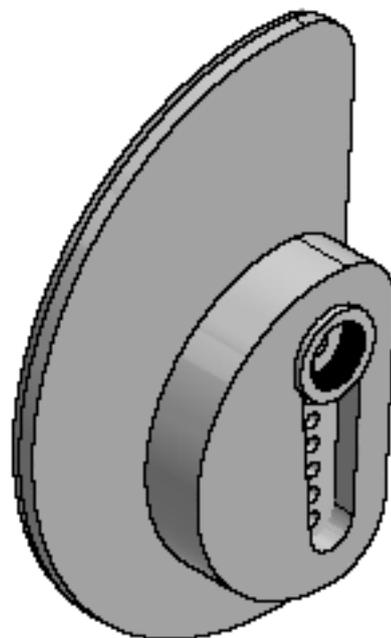
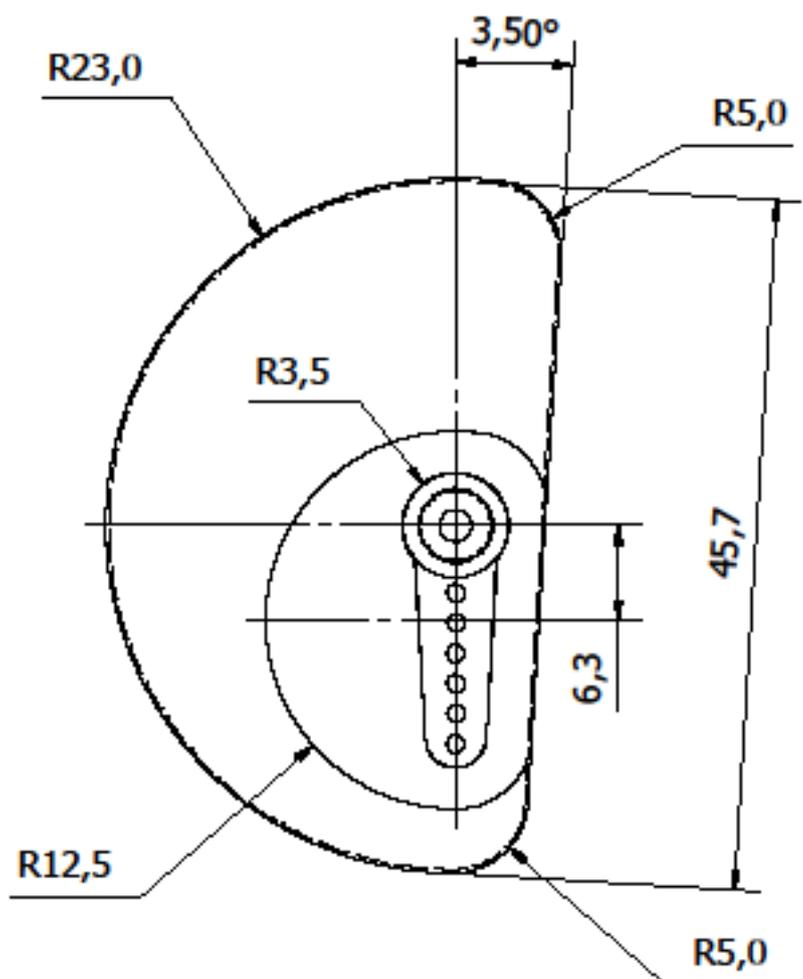
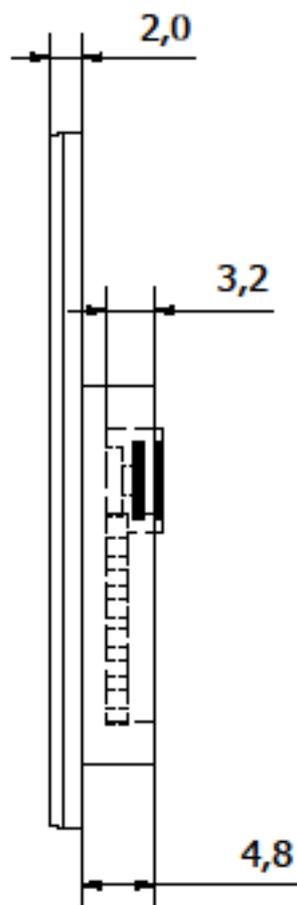
0

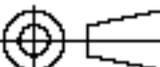
Biomag 1 (lista de partes)

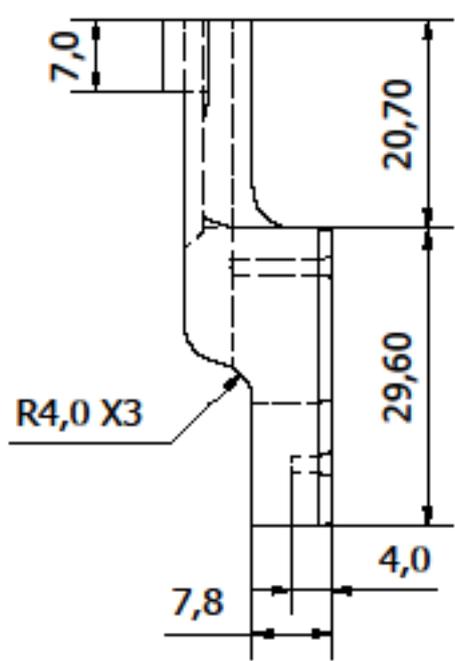
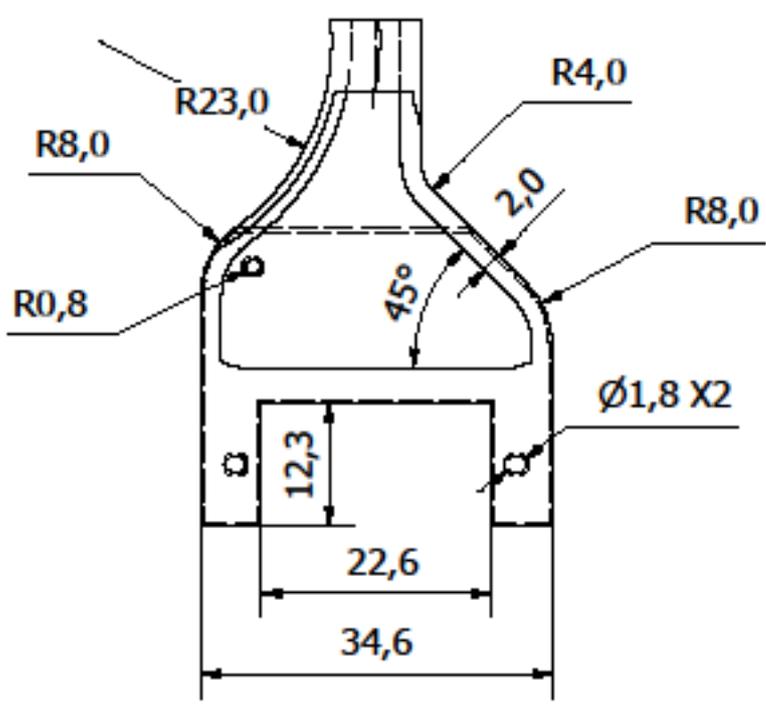
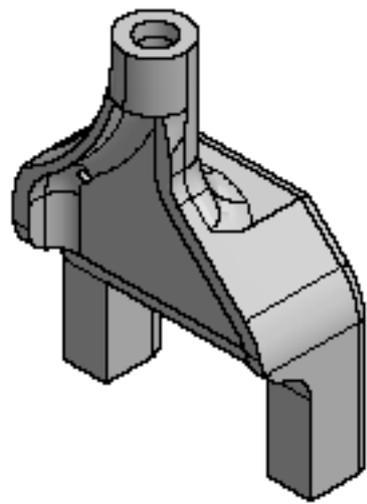
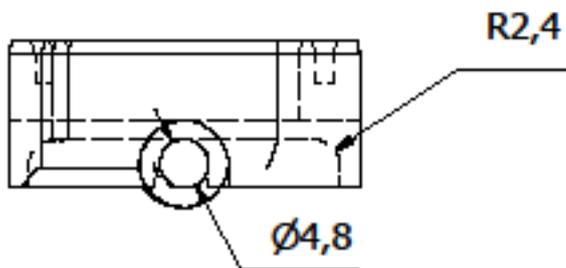
Escala  
1:7

Unidad  
mm

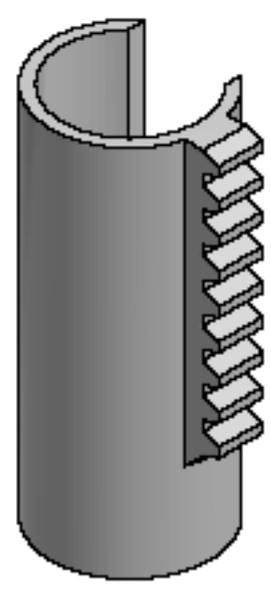
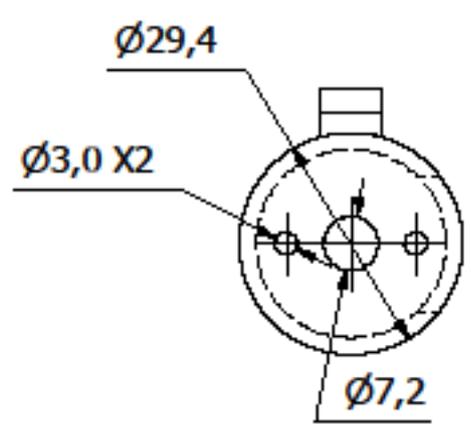
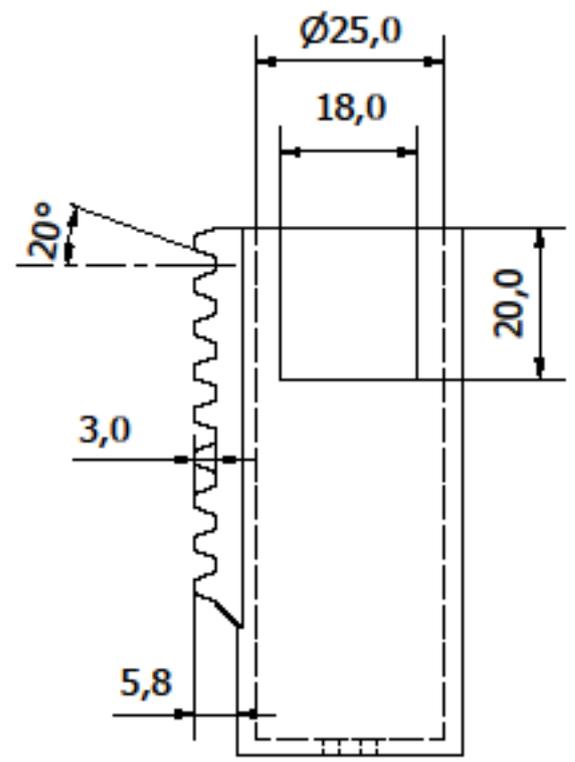
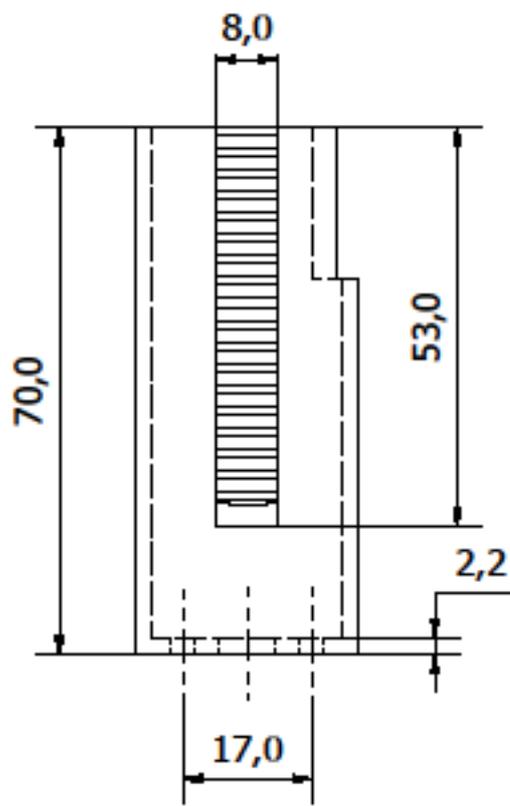




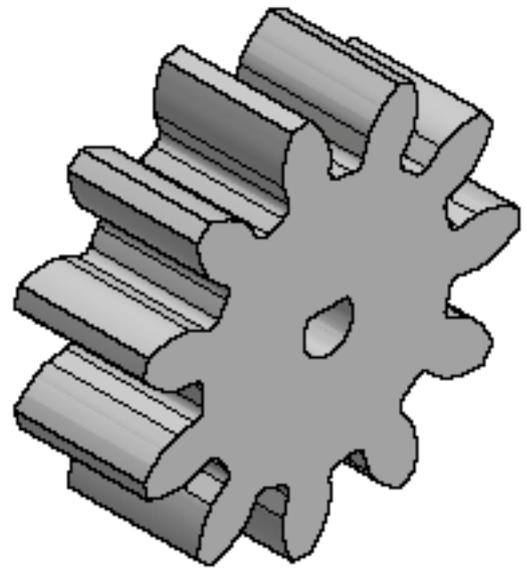
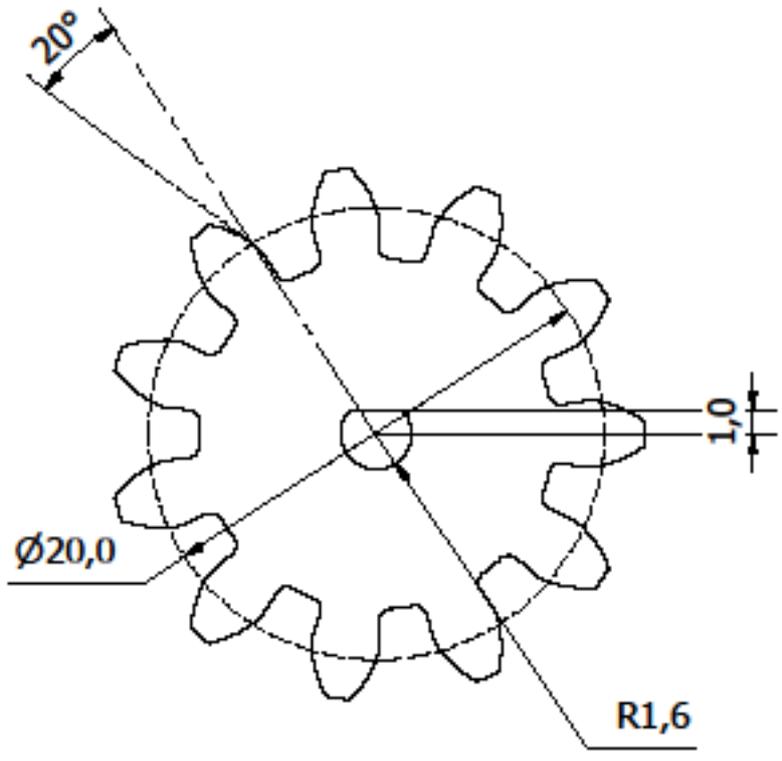
Dibujado por José Jerry Landívar Guartatanga Daniela Elizabeth Sánchez Orozco	Cliente Arturo Sócrates Palacios Ponce	Fecha 4/2/2024		
Escuela Superior Politécnica del Litoral	Pieza <b>1</b>	<b>Leva estranguladora</b>		
		Escala 2:1	Unidad mm	



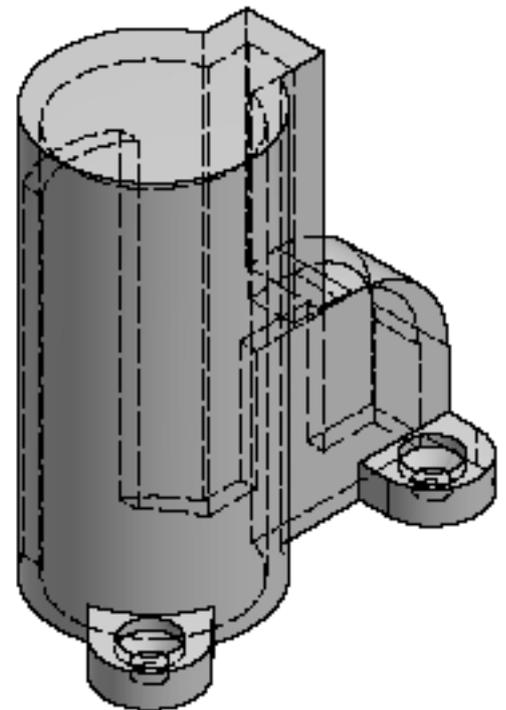
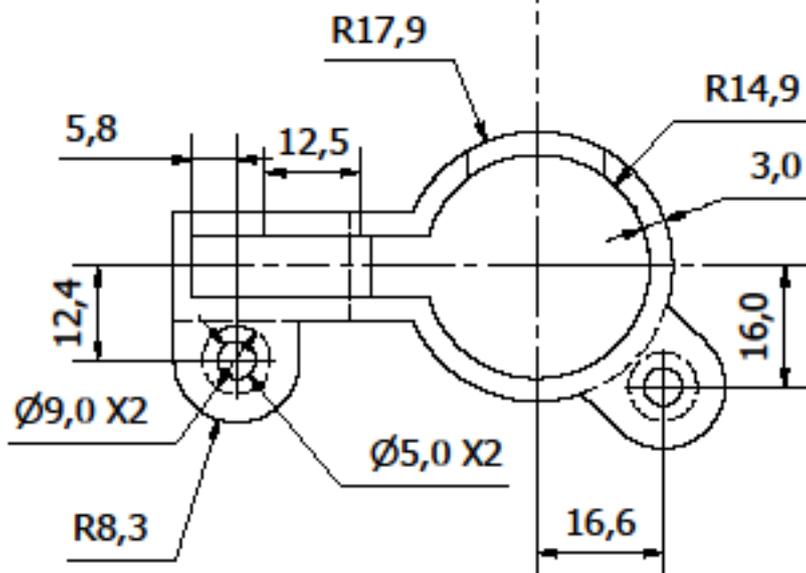
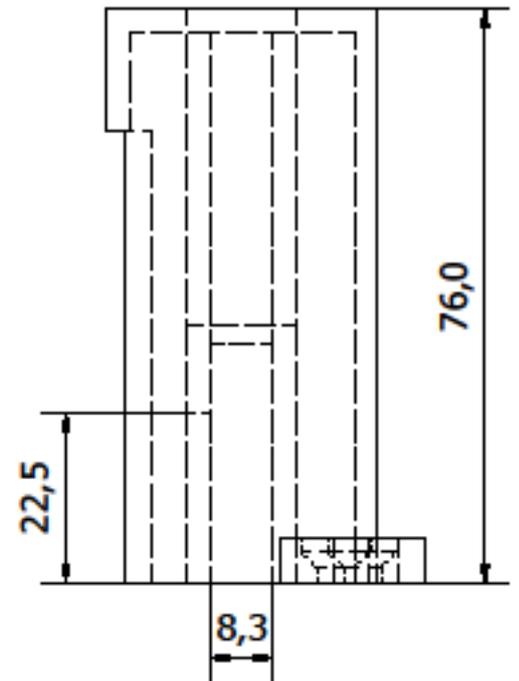
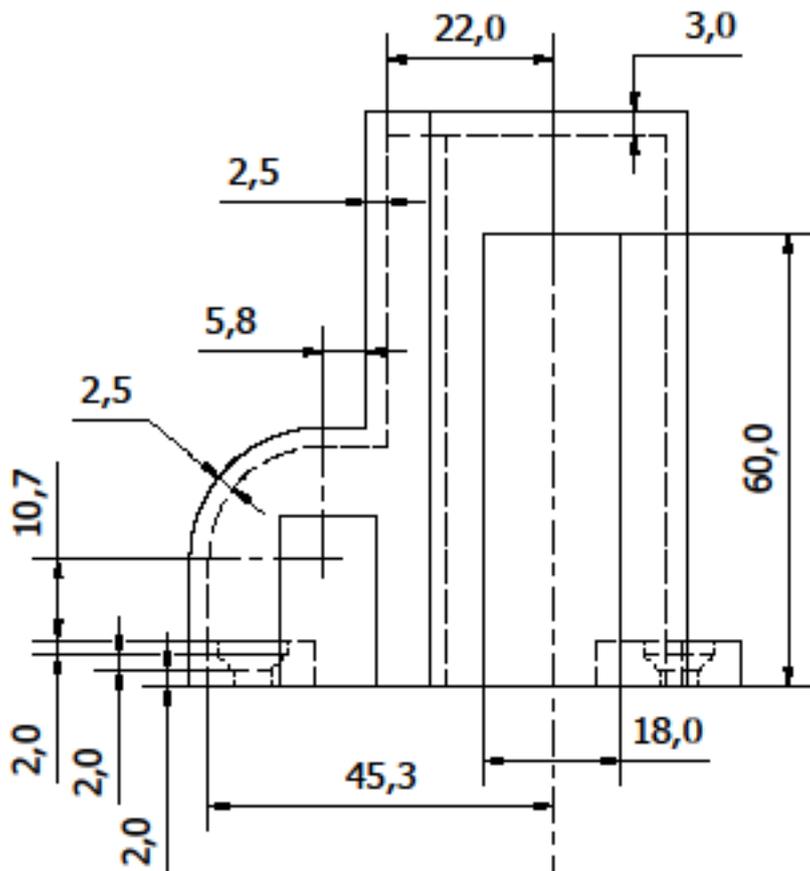
Dibujado por José Jerry Landívar Guartatanga Daniela Elizabeth Sánchez Orozco		Cliente Arturo Sócrates Palacios Ponce		Fecha 4/2/2024	
Escuela Superior Politécnica del Litoral	Pieza	Soporte de servomotor			
	2	Escala 4:3	Unidad mm		



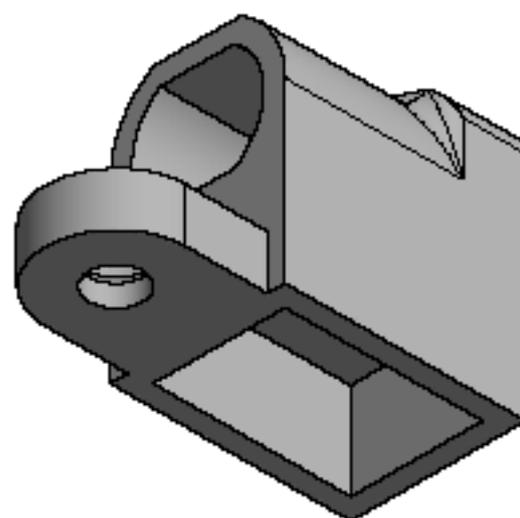
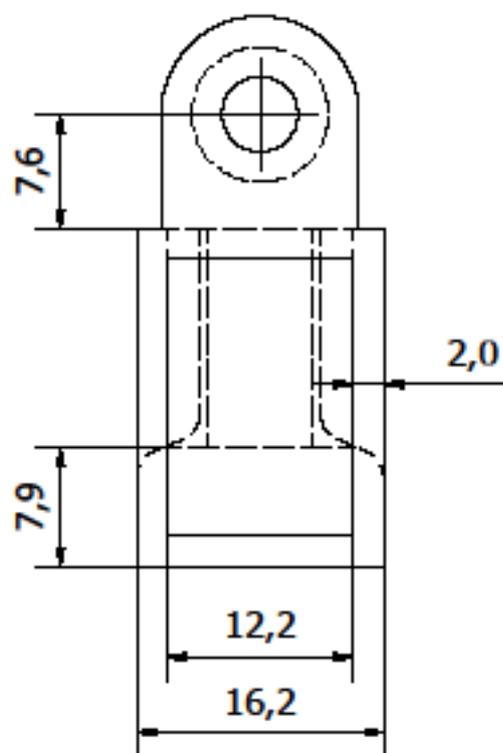
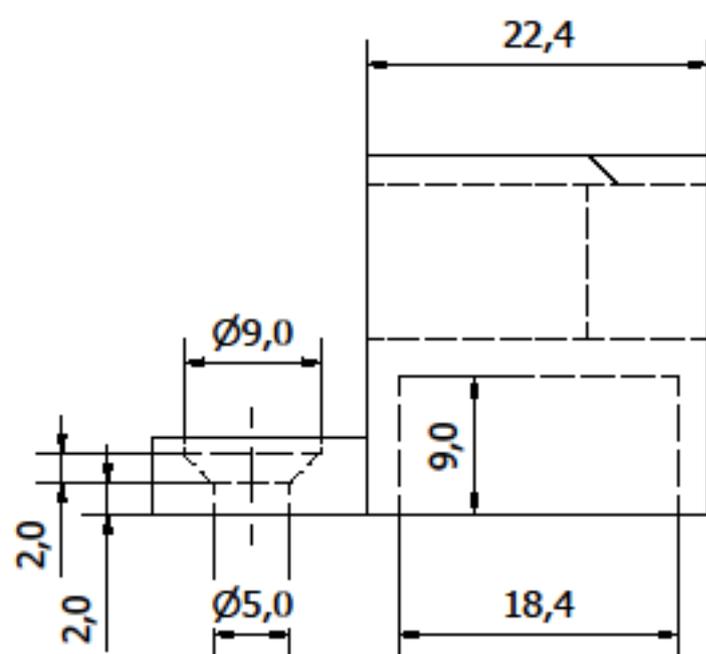
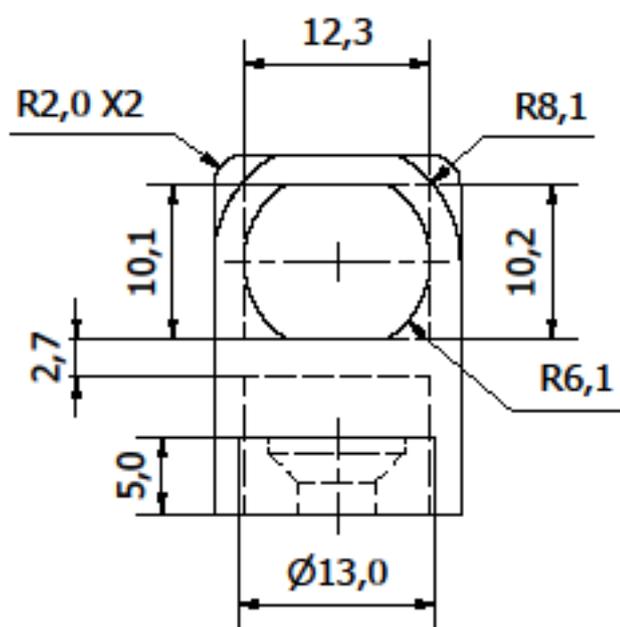
Dibujado por José Jerry Landívar Guartatanga Daniela Elizabeth Sánchez Orozco		Cliente Arturo Sócrates Palacios Ponce		Fecha 4/2/2024	
Escuela Superior Politécnica del Litoral	Pieza	Cremallera/camisa del motor			
	3	Escala 1 : 1	Unidad mm		



Dibujado por José Jerry Landívar Guartatanga Daniela Elizabeth Sánchez Orozco		Cliente Arturo Sócrates Palacios Ponce		Fecha 4/2/2024	
Escuela Superior Politécnica del Litoral	Pieza <b>4</b>	Piñón			
		Escala <b>3 : 1</b>	Unidad <b>mm</b>		



Dibujado por José Jerry Landívar Guartatanga Daniela Elizabeth Sánchez Orozco		Cliente Arturo Sócrates Palacios Ponce	Fecha 4/2/2024
Escuela Superior Politécnica del Litoral	Pieza <b>5</b>	Guarda (piñón-cremallera)	
		Escala 1 : 1	Unidad mm

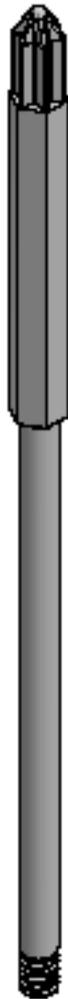
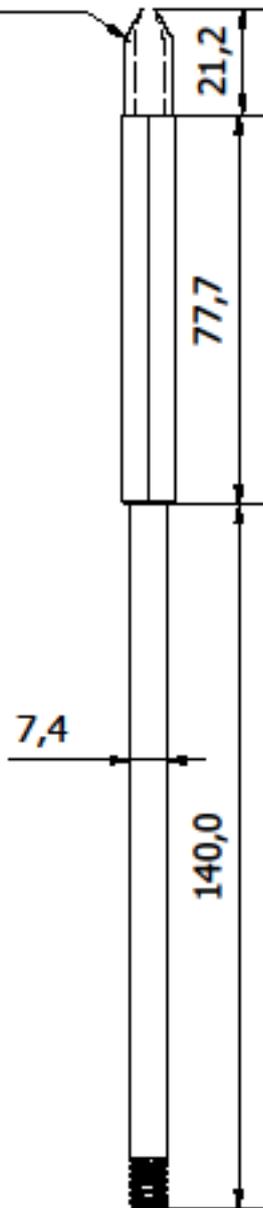


Dibujado por José Jerry Landívar Guartatanga Daniela Elizabeth Sánchez Orozco		Cliente Arturo Sócrates Palacios Ponce	Fecha 4/2/2024	
Escuela Superior Politécnica del Litoral	Pieza	Guarda (mini-motor)		
	6	Escala 2: 1	Unidad mm	

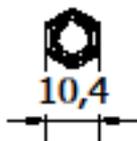
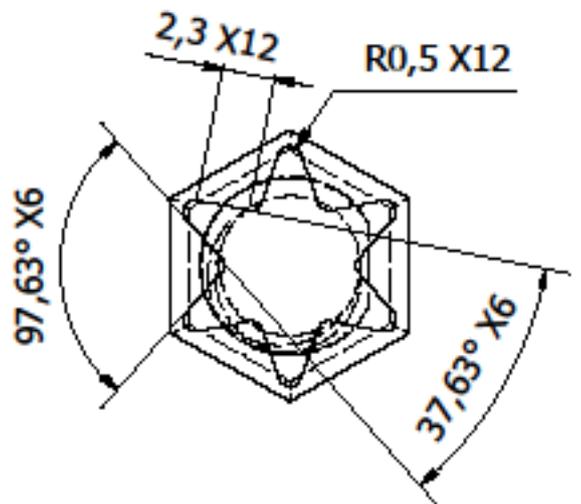


A

R0,5 X2

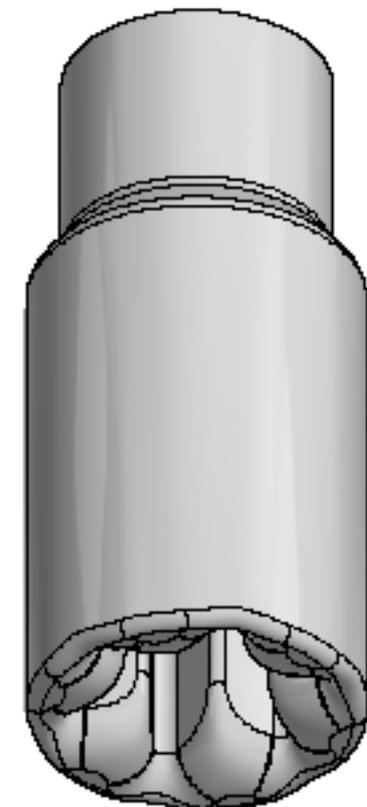
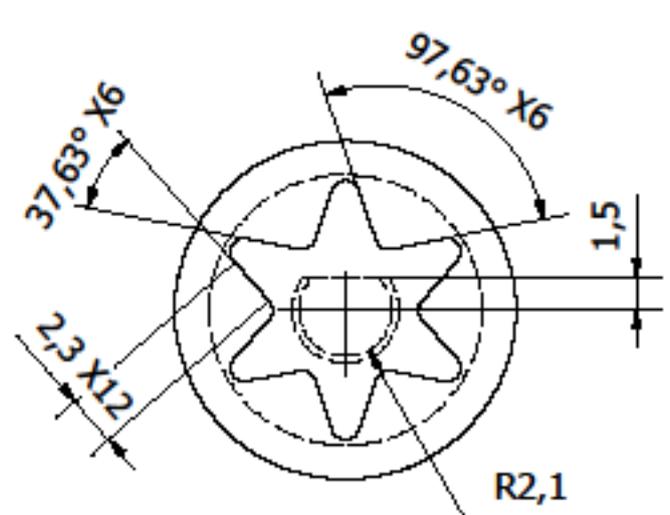
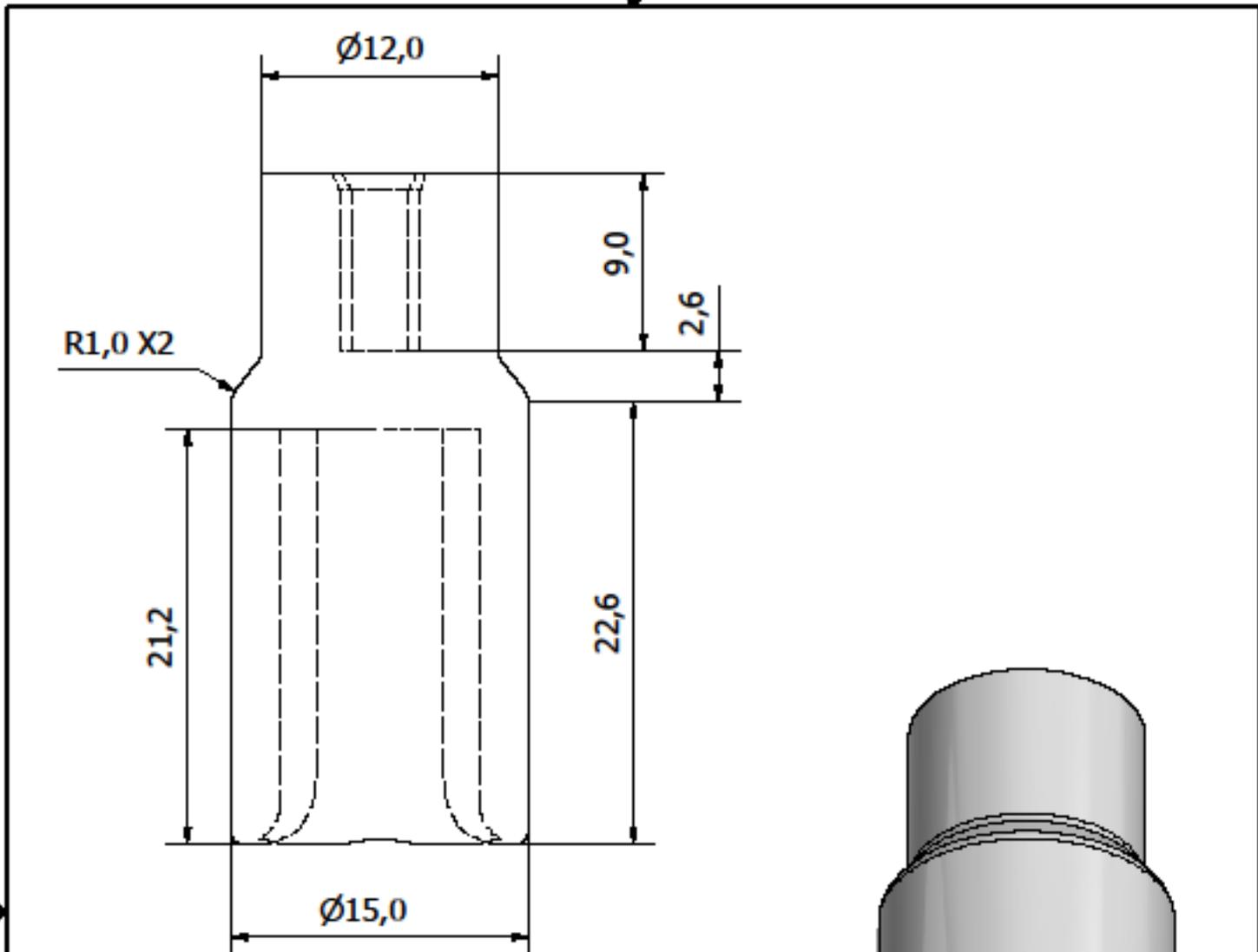


A ( 3 : 1 )

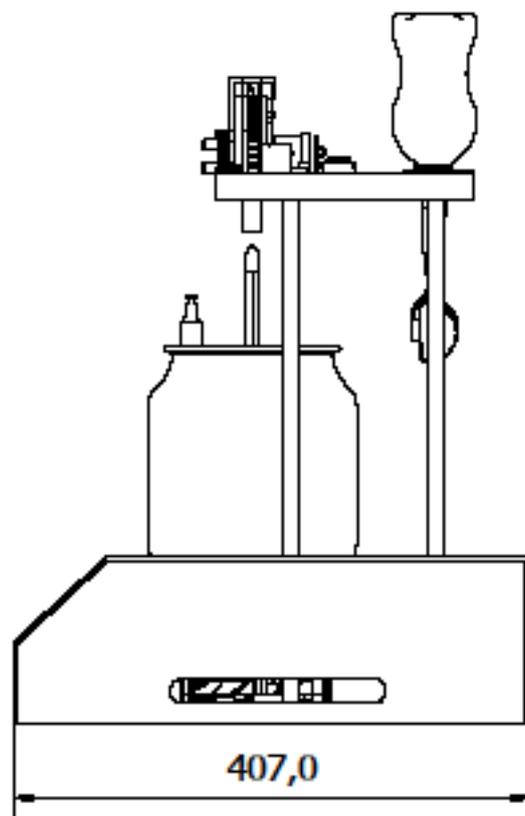
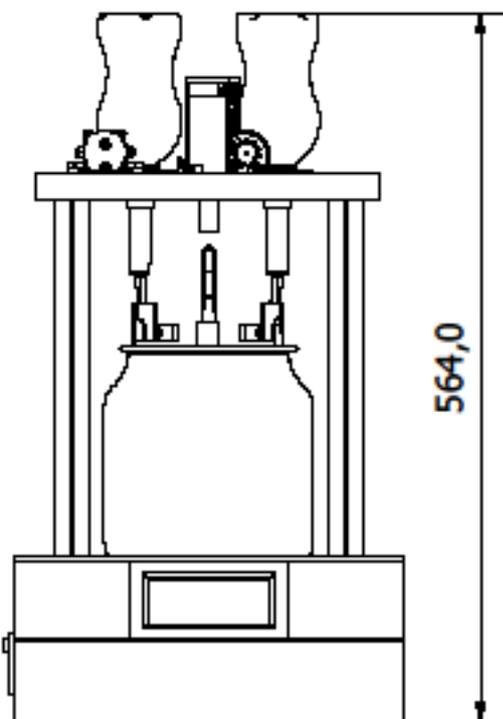
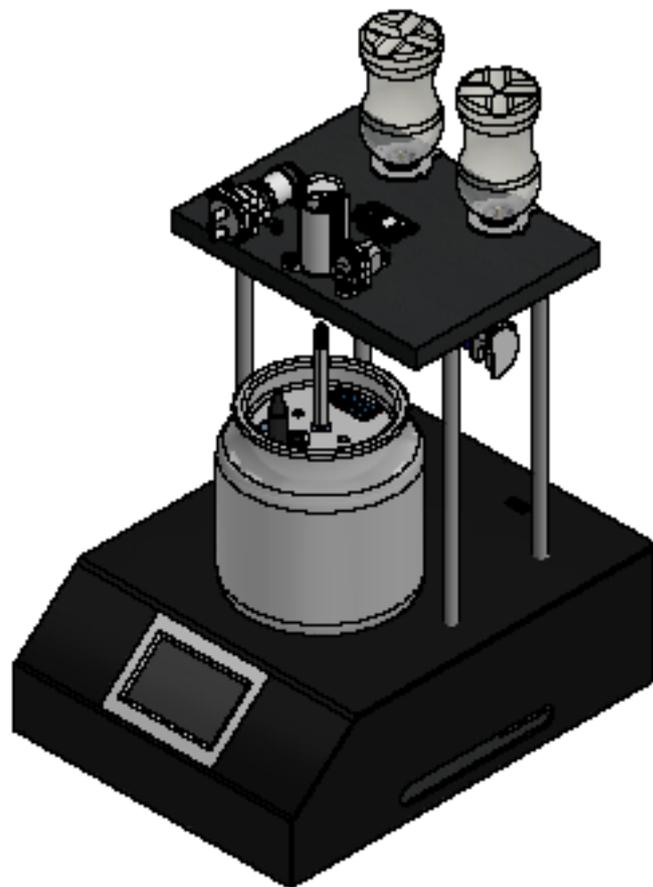
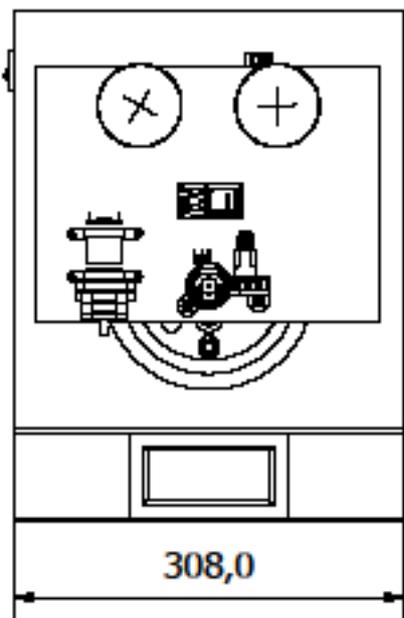


10,4

Dibujado por José Jerry Landívar Guartatanga Daniela Elizabeth Sánchez Orozco		Cliente Arturo Sócrates Palacios Ponce		Fecha 4/2/2024	
Escuela Superior Politécnica del Litoral	Pieza	Eje del agitador			
	7	Escala 2:3	Unidad mm		



Dibujado por José Jerry Landívar Guartatanga Daniela Elizabeth Sánchez Orozco		Cliente Arturo Sócrates Palacios Ponce		Fecha 4/2/2024	
Escuela Superior Politécnica del Litoral	Pieza	Acoplador eje-motor			
	8	Escala 3 : 1	Unidad mm		



Dibujado por  
 José Jerry Landívar Guartatanga  
 Daniela Elizabeth Sánchez Orozco

Cliente  
 Arturo Sócrates Palacios Ponce

Fecha  
 4/2/2024

Escuela Superior Politécnica del  
 Litoral

Pieza

-

Medidas generales

Escala  
 1 : 6

Unidad  
 mm

