

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Mecatrónica



**Diseño de un sistema automatizado de llenado de galones de dulce  
de leche por peso para la PYME CyC Dairy Food**

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de  
Ingeniero/a en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura

José Esteban Cubero Mora

Cartago, Costa Rica, 20 de noviembre de 2024

This work is licensed under a [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) “Attribution-NonCommercial 4.0 International” license.



Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several fluid, overlapping strokes that form a stylized name.

Cartago, Costa Rica, 20 de noviembre 2024

José Esteban Cubero Mora

Céd: 1-1817-0986

**Instituto Tecnológico de Costa Rica**  
**Programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica**  
**Proyecto final de Graduación**  
**Acta de Aprobación**

El profesor asesor del presente trabajo final de graduación, indica que el documento presentado por el estudiante cumple con las normas establecidas por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica para ser defendido ante el jurado evaluador, como requisito final para aprobar el curso Proyecto Final de Graduación y optar así por el título de Ingeniero en Mecatrónica, con el grado académico de Licenciatura.

Estudiante: José Esteban Cubero Mora

Proyecto: Diseño de un sistema automatizado de llenado de galones de dulce de leche por peso para la PYME CyC Dairy Food

**JOHANNA**  
**VANESSA MUÑOZ**  
**PEREZ (FIRMA)**

Digitally signed by  
JOHANNA VANESSA  
MUÑOZ PEREZ (FIRMA)  
Date: 2024.11.24  
19:43:49 -06'00'

---

Ing. Johanna Vanessa Muñoz Pérez  
Asesor

Cartago, Costa Rica, 20 de noviembre 2024

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**  
**PROGRAMA DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECATRÓNICA**  
**PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN**  
**ACTA DE APROBACIÓN**

Proyecto final de graduación defendido ante el presente jurado evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero(a) en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura, según lo establecido por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Estudiante: José Esteban Cubero Mora

Proyecto: Diseño de un sistema automatizado de llenado de galones de dulce de leche por peso para la PYME CyC Dairy Food

Miembros del jurado evaluador



ANA GABRIELA ORTIZ LEON (FIRMA)  
PERSONA FÍSICA, CPF-01-0775-0599.  
Fecha declarada: 26/11/2024 07:10 PM

VIVIANA MARIA  
ACEBEY ARANA  
(FIRMA)

Firmado digitalmente  
por VIVIANA MARIA  
ACEBEY ARANA (FIRMA)  
Fecha: 2024.11.21  
18:20:59 -06'00'

---

Dra. -Ing. Gabriela Ortiz León

Jurado

---

Ing. Viviana Acebey Arana

Jurado

Los miembros de este jurado dan fe de que el presente proyecto final de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica.

Cartago, Costa Rica, 20 de noviembre 2024

# Resumen

El presente proyecto se centra en el diseño de un sistema automatizado de llenado de galones de dulce de leche por peso para la empresa CyC Dairy Food. Actualmente, este proceso se realiza manualmente, lo cual genera inconsistencias en el llenado, sobrellenado frecuente y pérdidas económicas, además de fatiga en el personal. Con el objetivo de optimizar la precisión y eficiencia del proceso, se diseñó un sistema que busca garantizar un llenado repetible y preciso, minimizando el desperdicio y aumentando la productividad. El desarrollo siguió la metodología de Ulrich y Eppinger, desde el diagnóstico del proceso hasta la selección de un concepto ganador y su evaluación. Las validaciones se realizaron mediante una prueba de concepto, evaluando la viabilidad técnica y económica de la solución y asegurando una mejora potencial en la productividad y calidad del producto final. Los resultados obtenidos en las pruebas de validación demostraron que el sistema cumple con las métricas definidas en función de las necesidades del cliente, alcanzando una precisión de llenado con una desviación estándar menor al 2% y una tasa de éxito del 100% en la detección por parte de sensores y los controles de inicio y paro.

**Palabras clave:** Automatización, Llenado por peso, Control automático, PID, PLC

# Abstract

This project focuses on designing an automated gallon-filling system by weight for CyC Dairy Food. Currently, this process is performed manually, leading to inconsistencies in filling, frequent overfilling, economic losses, and operator fatigue. To optimize the accuracy and efficiency of the process, a system was designed to ensure repeatable and precise filling, minimizing waste and increasing productivity. The development followed the Ulrich and Eppinger methodology, from diagnosing the process to selecting a winning concept and its evaluation. Validations were conducted through a proof of concept, assessing the technical and economic feasibility of the solution and ensuring a potential improvement in productivity and product quality. The results obtained from the validation tests demonstrated that the system meets the metrics defined according to the client's needs, achieving a filling precision with a standard deviation of less than 2% and a 100% success rate in detection by sensors and in start and stop controls.

**Keywords:** Automation, Weight-based filling, Automatic control, PID, PLC

*Dedicado a mis papás, a mis hermanos, a mis amigos y a mi novia.*

# Agradecimientos

Le quiero agradecer primeramente a Dios, que me ha guiado y me sigue guiando en cada paso que doy en mi vida.

A mis papás, Alvaro y Gabriela, por el esfuerzo y el apoyo que me han dado durante todo este proceso universitario. Sin ellos esto no hubiera sido posible.

A mis hermanos, quienes siempre me motivaron a seguir adelante.

A mi novia, Dani, por siempre motivarme y confiar en mí.

A mis amigos, con los que formé experiencias para toda la vida.

A Juan, por siempre tener esa disposición de ayudar.

A la profesora Johanna, por su guía y apoyo en este proyecto.

José Esteban Cubero Mora

Cartago, Costa Rica, 20 de noviembre 2024

# Índice general

Índice de figuras	v
Índice de tablas	vii
Lista de símbolos y abreviaciones	viii
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Contexto . . . . .	1
1.2 Descripción del problema . . . . .	2
1.3 Síntesis del problema . . . . .	2
1.4 Objetivos . . . . .	3
1.5 Estructura del documento . . . . .	3
<b>2 Marco Teórico</b>	<b>5</b>
2.1 Sistema de dosificación . . . . .	5
2.2 Regulación para materiales en equipos para industria alimentaria . . . . .	6
2.2.1 Condiciones de los equipos y utensilios . . . . .	6
2.2.2 Uso de acero inoxidable en la industria alimentaria . . . . .	7
2.2.3 Acero inoxidable 304 . . . . .	7
2.3 Componentes para sistemas de automatización . . . . .	8
2.3.1 PLC (Controlador Lógico Programable) . . . . .	8
2.3.2 Microcontroladores . . . . .	8
2.3.3 HMI . . . . .	9
2.3.4 Tipos de válvulas . . . . .	9
2.3.5 Tipos de sensores . . . . .	11
2.3.6 Celda de carga . . . . .	13

---

2.4	Control automático . . . . .	15
2.4.1	Controlador PID . . . . .	16
2.4.2	Función de transferencia . . . . .	16
<b>3</b>	<b>Metodología</b>	<b>18</b>
3.1	Identificación de necesidades del cliente . . . . .	20
3.1.1	Entrevista con el cliente . . . . .	20
3.1.2	Jerarquización de necesidades . . . . .	22
3.1.3	Encuesta al cliente . . . . .	23
3.2	Especificaciones del producto . . . . .	24
3.2.1	Definición de métricas y valores objetivo . . . . .	24
3.2.2	Matriz de correlación entre métricas y necesidades . . . . .	25
3.3	Generación de conceptos . . . . .	26
3.3.1	Descomposición funcional del problema . . . . .	26
3.3.2	Proceso de búsqueda interna . . . . .	28
3.3.3	Proceso de búsqueda externa . . . . .	29
3.3.4	Construcción de conceptos . . . . .	30
3.4	Selección de conceptos . . . . .	34
3.4.1	Filtrado de conceptos . . . . .	34
3.4.2	Selección del candidato ganador . . . . .	35
3.5	Pruebas de validación de concepto . . . . .	37
3.5.1	Prueba 1: Evaluación de precisión y configuración de peso . . . . .	38
3.5.2	Prueba 2: Interacciones del usuario y detección . . . . .	38
3.5.3	Prueba 3: Evaluación del mantenimiento y limpieza del sistema . . . . .	39
3.5.4	Prueba 4: Evaluación del tiempo de respuesta de control . . . . .	40
<b>4</b>	<b>Propuesta de diseño</b>	<b>41</b>
4.1	Diagnóstico del proceso actual . . . . .	41
4.2	Escogencia de componentes para el diseño . . . . .	44
4.2.1	Conexión a Toma Corriente (para Aceptar/Almacenar Energía Externa)	45
4.2.2	Sensor de Proximidad (para Detección de Galón) . . . . .	45
4.2.3	Interfaz de usuario con pantalla táctil(HMI) (para Configuración del Dispositivo) . . . . .	46

4.2.4	Botón físico de encendido y apagado (para Señal de Inicio) . . . . .	47
4.2.5	Válvula solenoide (para Dosificación de Dulce de Leche) . . . . .	48
4.2.6	PLC (para Control del Sistema) . . . . .	48
4.2.7	Celdas de carga (para Medición del Peso) . . . . .	49
4.3	Integración de la solución en el entorno de la planta . . . . .	50
4.3.1	Acople de la válvula . . . . .	50
4.3.2	Incorporación de la celda de carga . . . . .	52
4.3.3	Montaje de botón de encendido y apagado . . . . .	53
4.3.4	Montaje del sensor de proximidad . . . . .	54
4.3.5	Colocación del HMI . . . . .	55
4.4	Diseño de interfaz para el usuario . . . . .	56
4.5	Diseño del control automático del sistema . . . . .	60
4.6	Diseño de la lógica de programación del PLC . . . . .	65
<b>5</b>	<b>Análisis Económico</b> . . . . .	<b>72</b>
5.1	Costos del proyecto . . . . .	72
5.2	Ahorros Proyectados . . . . .	74
5.3	Retorno de la Inversión . . . . .	74
5.4	Beneficios a Largo Plazo . . . . .	75
5.5	Indicadores Económicos . . . . .	75
<b>6</b>	<b>Resultados y Análisis</b> . . . . .	<b>77</b>
6.1	Prueba de concepto . . . . .	78
6.1.1	Objetivo de de la prueba de concepto . . . . .	78
6.1.2	Explicación y armado de la prueba de concepto . . . . .	78
6.2	Prueba #1: Evaluación de precisión y configuración de peso . . . . .	81
6.2.1	Análisis Estadístico de la Precisión de Llenado . . . . .	82
6.3	Prueba #2: Interacciones del usuario y detección . . . . .	86
6.4	Prueba #3: Evaluación del mantenimiento y limpieza del Sistema . . . . .	87
6.4.1	Validación del tiempo medio requerido para el mantenimiento . . . . .	88
6.4.2	Validación del tiempo medio requerido para la limpieza . . . . .	89
6.5	Prueba #4: Validación del control automático . . . . .	90
6.6	Resumen de validaciones . . . . .	93

<b>7 Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>94</b>
7.1 Conclusiones . . . . .	94
7.2 Recomendaciones . . . . .	95
<b>Bibliografía</b>	<b>96</b>
<b>A Datos experimentales</b>	<b>100</b>
<b>B Programación</b>	<b>105</b>
B.1 Programación en Matlab para control automático. . . . .	105
B.2 Programación en Arduino para la prueba de concepto. . . . .	107
<b>C Planos</b>	<b>111</b>

# Índice de figuras

3.1	Etapas de la metodología de Ulrich Eppinger. . . . .	18
3.2	Descomposición general del problema. . . . .	27
3.3	Descomposición funcional detallada del problema. . . . .	27
4.1	Configuración actual del llenado manual de galones de dulce de leche. . . . .	44
4.2	Proceso actual del llenado de galones de dulce de leche. . . . .	44
4.3	Diseño del acople entre la salida de la marmita y la válvula. . . . .	51
4.4	Diseño de la plataforma superior de pesaje para la celda de carga. . . . .	52
4.5	Diseño de la base de soporte inferior para la celda de carga. . . . .	52
4.6	Acomodo de piezas diseñadas para la celda de carga. . . . .	53
4.7	Diseño de carcasa para botón OFF/ON. . . . .	53
4.8	Diseño de soporte para montaje del sensor de proximidad. . . . .	54
4.9	Concepto de montaje del sensor de proximidad. . . . .	55
4.10	Diseño de montaje para HMI. . . . .	55
4.11	Conexión entre PLC y HMI en software TIA Portal. . . . .	56
4.12	Interfaz para la HMI diseñada en el software TIA Portal. . . . .	57
4.13	Interfaz de entrada de peso para el usuario en la HMI diseñada en TIA Portal. . . . .	58
4.14	Vinculación de la variable de peso objetivo entre el PLC y la interfaz HMI. . . . .	59
4.15	Vinculación de la variable de detección de galón entre el PLC y la interfaz HMI. . . . .	59
4.16	Vinculación de la variable de medición del peso entre el PLC y la interfaz HMI. . . . .	59
4.17	Montaje especial de medición para obtener la función de transferencia. . . . .	61
4.18	Interfaz de Matlab para estimar función de transferencia. . . . .	62
4.19	Comparación entre la salida del modelo de la planta y la función de transferencia estimada #1. . . . .	63
4.20	Respuesta ante el escalón de la función de transferencia estimada #1 sin control. . . . .	63

---

4.21	Respuesta ante el escalón de la función de transferencia estimada #2 sin control.	64
4.22	Parámetros modificables en PID Tuner. . . . .	64
4.23	Diagrama del control automático planteado. . . . .	65
4.24	Diagrama de flujo de programación del PLC. . . . .	67
4.25	Programación de condiciones iniciales en TIA Portal. . . . .	68
4.26	Programación de parada de emergencia en TIA Portal. . . . .	68
4.27	Programación de regulación de válvula en TIA Portal. . . . .	68
4.28	Calibración del bloque PID en TIA Portal. . . . .	71
6.1	Prueba de concepto realizada para la validación de métricas. . . . .	81
6.2	Gráfica de prueba de normalidad para peso objetivo de 150 gramos. . . . .	83
6.3	Gráfica de prueba de normalidad para peso objetivo de 300 gramos. . . . .	84
6.4	Gráfica de prueba de normalidad para peso objetivo de 500 gramos. . . . .	84
6.5	Resultado de prueba de hipótesis para peso objetivo de 150 gramos. . . . .	85
6.6	Resultado de prueba de hipótesis para peso objetivo de 300 gramos. . . . .	85
6.7	Resultado de prueba de hipótesis para peso objetivo de 500 gramos. . . . .	85
6.8	Gráfica completa de la simulación del proceso de llenado y control. . . . .	91
6.9	Tiempo de llenado final obtenido por simulación en Matlab. . . . .	92
6.10	Tiempo de inicio de control obtenido por simulación en Matlab. . . . .	92

# Índice de tablas

3.1	Necesidades interpretadas posteriores al proceso de entrevistas. . . . .	21
3.2	Clasificación de importancia de necesidades finales posterior a encuesta. . . .	24
3.3	Métricas y Valores Objetivo. . . . .	25
3.4	Matriz Métricas-Necesidades. . . . .	26
3.5	Posibles soluciones de subproblemas para la formulación de conceptos. . . . .	31
3.6	Combinaciones propuestas para cada subproblema. . . . .	31
3.7	Matriz de filtrado de conceptos. . . . .	35
3.8	Peso de los criterios. . . . .	36
3.9	Tabla de Evaluación de Conceptos. . . . .	37
5.1	Listado de costos para el proyecto. . . . .	73
5.2	Cálculo de costos y beneficios del proyecto . . . . .	75
6.1	Resultados de la detección de distintos envases con el sensor capacitivo. . . .	86
6.2	Resultados de pruebas de detección de galones y funcionamiento de botones.	87
6.3	Tiempos obtenidos en Matlab para el control automático diseñado. . . . .	93
6.4	Resumen de validaciones para métricas y valores objetivo. . . . .	93
A.1	Datos experimentales tomados en la fábrica de dulce de leche al inicio del proceso. . . . .	100
A.2	Datos experimentales tomados en la fábrica de dulce de leche al final del proceso.	101
A.3	Datos obtenidos para prueba de concepto con valor objetivo de 150 gramos. .	102
A.4	Datos obtenidos para prueba de concepto con valor objetivo de 300 gramos. .	103
A.5	Datos obtenidos para prueba de concepto con valor objetivo de 500 gramos. .	104

# Lista de símbolos y abreviaciones

## Abreviaciones

AC	Corriente Alterna (Alternating Current)
ADC	Convertidor Analógico a Digital (Analog-to-Digital Converter)
DC	Corriente Directa (Direct Current)
HMI	Interfaz Hombre-Máquina (Human-Machine Interface)
IO	Entradas y Salidas (Input/Output)
PID	Control Proporcional-Integral-Derivativo (Proportional-Integral-Derivative Control)
PLC	Controlador Lógico Programable (Programmable Logic Controller)
PWM	Modulación por Ancho de Pulso (Pulse Width Modulation)

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 Contexto

Las pequeñas y medianas empresas (PYMES) son el motor del desarrollo económico y comercial de muchos países, incluyendo el nuestro. Estas empresas no solo generan empleo y promueven la innovación, sino que también desempeñan un papel importante en la producción de bienes y servicios que enriquecen el mercado local y nacional. En este contexto, el presente proyecto se enfoca en una de estas empresas: CyC Dairy Food [1].

CyC Dairy Food es una PYME ubicada en el Carmen de Guadalupe dedicada a la producción de productos lácteos, específicamente dulce de leche. La empresa cuenta con ganadería propia de donde se obtiene la leche necesaria para la fabricación del producto [2].

Con una producción diaria de aproximadamente 375 galones de dulce de leche, la empresa ha establecido un proceso de producción eficiente que hace uso de tres marmitas y una mezcladora principal para la elaboración del producto. La mezcladora principal es donde se realiza el mezclado inicial de los ingredientes, garantizando una mezcla homogénea y uniforme [2].

Esta mezcla homogénea luego es transferida a las marmitas, que son las encargadas de la cocción del producto para obtener el dulce de leche con la textura y el sabor buscado. En las marmitas es donde se enfocará el presente proyecto de automatización del proceso de llenado de galones de dulce de leche por peso, ya que en éstas es donde se realiza el llenado del producto [3].

## 1.2 Descripción del problema

En la empresa CyC Dairy Food, el proceso de llenado de galones de dulce de leche se lleva a cabo manualmente en las marmitas, donde un trabajador regula la cantidad de producto que se envasa utilizando una llave manual. Este método presenta varios problemas significativos.

El principal inconveniente es la inconsistencia en la cantidad de dulce de leche envasado. Para evitar reclamos por cantidades insuficientes, el método manual a menudo resulta en un sobrellenado constante de los galones, lo que genera pérdidas económicas notables debido al desperdicio de producto.

Además, la supervisión y el control manual del proceso implican una ineficiencia en el uso del tiempo del personal, que debe dedicar recursos a esta tarea repetitiva y mecánica. Esta situación no solo disminuye la productividad general de la planta, sino que también provoca fatiga y estrés en los empleados, aumentando el riesgo de errores durante el llenado.

Otro problema crítico es la velocidad de dispensación del dulce de leche desde la mezcladora principal hasta los galones. Un tiempo prolongado de llenado puede causar el enfriamiento y endurecimiento del dulce de leche, lo que puede provocar atascos en el contenedor y afectar negativamente la calidad del producto final.

## 1.3 Síntesis del problema

El problema consiste en la ineficiencia y los desafíos de calidad asociados con el proceso actual de llenado manual de galones de dulce de leche. Este método manual resulta en un sobrellenado frecuente, lo que genera pérdidas económicas significativas debido al desperdicio de producto. El trabajo manual repetitivo también presenta riesgos ergonómicos para los empleados, lo que puede resultar en problemas de salud a largo plazo y afectar la productividad.

## 1.4 Objetivos

### Objetivo General

- Diseñar un sistema automatizado de llenado de galones de dulce de leche que mejore la eficiencia, precisión y repetibilidad del proceso de producción, reduciendo el desperdicio de producto y optimizando el uso de recursos humanos.

### Objetivos Específicos

- Realizar un diagnóstico detallado del proceso actual de llenado de galones de dulce de leche, identificando áreas de mejora, tiempos de operación y posibles inconsistencias en el llenado.
- Formular las modificaciones necesarias a nivel de planta para integrar la solución automática, incluyendo la selección y disposición de sensores, actuadores y esquemáticos del sistema.
- Diseñar el control automático para el llenado de galones de dulce de leche, asegurando la correcta medición y automatización del proceso.
- Validar el funcionamiento correcto del sistema automatizado haciendo uso de una prueba de concepto, asegurando la repetibilidad y precisión en el llenado de los galones.

## 1.5 Estructura del documento

A continuación se presentan las principales secciones que se tratarán en el desarrollo de este proyecto, junto con una breve descripción:

- **Capítulo 1 Introducción:** En este capítulo se ofrece una introducción al proyecto, proporcionando un contexto general sobre la empresa en la que se desarrolla, el problema identificado, y los objetivos del trabajo a realizar.
- **Capítulo 2 Marco Teórico:** Este capítulo presenta información relevante que sustenta el proyecto, e incluye una revisión de la literatura relacionada con temas como el control por peso, sensores, dispositivos electrónicos, entre otros. Se presenta la información necesaria para entender los conceptos clave y las herramientas utilizadas en el proyecto.

- **Capítulo 3 Metodología:** En este capítulo se describe la metodología seguida para la ejecución del proyecto. Se detallan los pasos y procedimientos empleados para llegar a la solución óptima para el problema planteado.
- **Capítulo 4 Propuesta de Diseño:** Este capítulo abarca el desarrollo detallado de la solución. En este, todos los aspectos del diseño se justifican adecuadamente, asegurando que se responda a los objetivos propuestos en el trabajo.
- **Capítulo 5 Resultados y Análisis:** En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las pruebas de validación de la solución junto con un análisis R&R para justificar la repetibilidad de la solución planteada. Además, se presenta un análisis económico para evaluar la viabilidad financiera de la implementación de la solución.
- **Capítulo 6 Conclusiones y Recomendaciones:** Este capítulo presenta las conclusiones derivadas del proyecto, además de recomendaciones para la implementación futura del sistema y posibles mejoras.
- **Capítulo 7 Referencias bibliográficas:** En este capítulo se presentan las referencias bibliográficas que se utilizaron para desarrollar el proyecto.
- **Capítulo 8 Apéndices y anexos:** En este capítulo se presentan los apéndices y anexos que se incluyeron en el proyecto para una mejor comprensión del mismo.

El principal aporte de ingeniería del presente proyecto es la formulación de un sistema automatizado de llenado de galones de dulce de leche basado en principios de ingeniería mecatrónica. Este aporte se puede evidenciar en dos aspectos principales: en primer lugar, se realiza un análisis detallado para identificar la solución más efectiva para el problema de llenado manual, evaluando diversas alternativas en términos de precisión, eficiencia, entre otros. En segundo lugar, se valida la viabilidad de la solución propuesta mediante simulaciones y un dispositivo físico de prueba, asegurando que el diseño teórico sea práctico y aplicable en un contexto real.

# Capítulo 2

## Marco Teórico

En este capítulo se presentan los conceptos y componentes clave relacionados con el diseño del sistema automatizado de llenado de galones de dulce de leche. Se abordan temas como la dosificación, las normativas para materiales en la industria alimentaria, y los fundamentos del control automático, incluyendo los dispositivos y métodos seleccionados para asegurar la precisión y eficiencia del proceso.

### 2.1 Sistema de dosificación

Un sistema de dosificación es una solución tecnológica diseñada para distribuir un material en cantidades y secuencias temporales exactas, adaptándose a las necesidades específicas de diferentes industrias, como la química, cerámica o alimentaria. Estos sistemas permiten mantener un control automatizado sobre el proceso de dosificación, mejorando la homogeneidad del producto final, optimizando los costos de producción, y asegurando una alta precisión y productividad en el proceso [4].

Existen varios tipos de sistemas de dosificación, entre los cuales destacan los sistemas de dosificación volumétrica, caudalimétrica y por peso. En la dosificación volumétrica, el material se distribuye con base en el volumen controlado, utilizando bombas como las peristálticas o de pistón para garantizar la precisión del volumen dispensado. La dosificación por caudalímetro mide el flujo o caudal de producto y cierra una válvula automáticamente al alcanzar la cantidad deseada, siendo común en aplicaciones que requieren alta precisión y un

enfoque higiénico [5].

El sistema de dosificación por peso, que es el enfoque principal en este proyecto, se basa en la medición del peso del material durante el proceso de llenado. Este método es reconocido por su muy elevada precisión, ya que compensa las variaciones de densidad del material o del envase, garantizando que la cantidad dosificada sea exacta. Debido a su alta precisión, es ideal para aplicaciones donde se manejan productos de alto costo o que requieren una dosificación exacta, como en la industria farmacéutica o alimentaria. Aunque este sistema puede ser más lento y requiere calibraciones periódicas para mantener su fiabilidad, su capacidad para minimizar variaciones y asegurar la calidad del producto final lo convierte en una opción preferida para procesos críticos donde la precisión es fundamental [5].

## **2.2 Regulación para materiales en equipos para industria alimentaria**

La industria alimentaria exige ciertas normativas para asegurar que los materiales utilizados en los equipos y utensilios no comprometan la seguridad de los alimentos. En este contexto, el Reglamento Técnico Centroamericano establece directrices claras para garantizar que los equipos y utensilios utilizados en la producción alimentaria cumplan con estándares que prevengan la contaminación y faciliten la limpieza y el mantenimiento.

### **2.2.1 Condiciones de los equipos y utensilios**

Según el artículo 6 del Reglamento Técnico Centroamericano, específicamente en el Anexo 4 (Industria de Alimentos y Bebidas Procesadas: Buenas Prácticas de Manufactura - Principios Generales), los equipos y utensilios deben estar diseñados y construidos de tal forma que se minimice el riesgo de contaminación del alimento. Esto implica que deben permitir un fácil desmontaje, acceso para inspección, mantenimiento y limpieza, asegurando que su funcionamiento sea conforme al uso destinado. Además, los materiales deben ser no absorbentes, resistentes a la corrosión y a las operaciones repetidas de limpieza y desinfección, sin transferir al producto sustancias tóxicas, olores ni sabores [6].

### 2.2.2 Uso de acero inoxidable en la industria alimentaria

Con base en lo mencionado anteriormente sobre el Reglamento Técnico Centroamericano, uno de los materiales que cumple con los requisitos para equipos en la industria alimentaria es el acero inoxidable, el cual se ha convertido en uno de los más utilizados en este sector. Este material es ampliamente valorado por su alta resistencia a la corrosión, un factor fundamental para evitar la contaminación durante la manipulación y procesamiento de alimentos. Además, debido a que su superficie es compacta y poco rugosa, se facilita la limpieza profunda, permitiendo eliminar cualquier tipo de bacterias sin comprometer la integridad del material [7].

El acero inoxidable se distingue por su elevada resistencia a las variaciones térmicas, golpes y tensiones mecánicas, lo que lo convierte en una opción ideal para entornos industriales exigentes. En la Unión Europea, los aceros inoxidables austeníticos, como las aleaciones 1.4301 y 1.4404, son los más recomendados para estar en contacto con alimentos. En situaciones de mayor exposición a la corrosión, se recurre a aceros dúplex, mientras que la aleación de azufre 1.4305 es evitada debido a su inadecuación para la industria alimentaria [7].

### 2.2.3 Acero inoxidable 304

A la hora de seleccionar el tipo de acero más adecuado para las distintas aplicaciones, se deben de tomar en cuenta criterios como la resistencia necesaria a la corrosión, las condiciones en las que se va a operar y la facilidad del mecanizado. Entre los tipos más comunes de acero inoxidable, se encuentran los tipos 304, 316 y 430, cada uno con características específicas que los hacen más o menos adecuados para diferentes aplicaciones. Para el caso del acero inoxidable 304, este es el más utilizado en la industria alimentaria debido a su alta resistencia a la corrosión, su capacidad para soportar altas temperaturas, y su facilidad para ser trabajado en procesos de soldadura y mecanizado. Estas propiedades lo convierten en una opción ideal para equipos y utensilios que deben cumplir con estrictas normativas de seguridad alimentaria, especialmente en entornos donde se requiere resistencia a productos químicos o a la exposición constante al agua. Aparte de estos puntos, tiene una rugosidad baja, por lo que se facilita su limpieza [8].

## 2.3 Componentes para sistemas de automatización

Dentro de la automatización industrial, diversos componentes son fundamentales para asegurar la operación eficiente y precisa de los procesos. A continuación, se presentan componentes que son clave para el desarrollo de automatizaciones industriales, los cuales también son relevantes en el contexto del presente proyecto.

### 2.3.1 PLC (Controlador Lógico Programable)

Un Controlador Lógico Programable (PLC) es un dispositivo clave en la automatización industrial, cuyo uso principal es controlar y automatizar procesos de manera eficiente y segura. Es decir, un PLC es una especie de computadora industrial diseñada específicamente para gestionar la operación de maquinaria y sistemas complejos. Este controlador se encarga de supervisar y controlar las entradas y salidas de sensores y actuadores, permitiendo que estos dispositivos realicen funciones automáticas de manera precisa y efectiva [9].

El funcionamiento de un PLC se basa en un ciclo continuo de operaciones que garantiza un control eficiente del sistema. Primero, realiza un autodiagnóstico de sus circuitos para detectar posibles fallos, emitiendo una señal de advertencia si se encuentra algún problema. Luego, lee el estado de las entradas, registrando si están activas o inactivas, y almacena esta información en su memoria. Con estos datos, el PLC ejecuta el programa previamente definido por el usuario, siguiendo las instrucciones para controlar el proceso. Finalmente, actualiza las salidas en tiempo real según la lógica del programa, ajustando la operación del sistema de manera precisa [9].

Entre las características destacadas de los PLC se incluyen su control seguro de entradas y salidas, compatibilidad con múltiples lenguajes de programación, una interfaz amigable para el usuario, la capacidad de conectarse con sistemas de supervisión y la posibilidad de reconfigurar la programación según sea necesario [9].

### 2.3.2 Microcontroladores

A diferencia de los PLCs, los microcontroladores son dispositivos más simples y económicos, diseñados para realizar tareas específicas dentro de un dispositivo. Mientras que los PLCs

están diseñados para operar en condiciones industriales exigentes y ofrecer una solución robusta y adaptable, los microcontroladores están integrados en equipos más pequeños, ideales para aplicaciones donde el costo y el tamaño son factores críticos [10].

A pesar de que son menos costosos y con menor capacidad para manejar condiciones extremas, los microcontroladores cumplen eficientemente funciones especializadas en entornos menos exigentes. Además, otra diferencia es que suelen ser de bajo consumo energético y se centran en ejecutar un único programa específico, en contraste con los PLCs, que manejan múltiples tareas y se adaptan a una amplia gama de aplicaciones industriales [10].

Por último, una de las diferencias clave entre estos dispositivos es que los microcontroladores se programan para tareas específicas y no suelen tener la misma flexibilidad para modificar o actualizar sus programas una vez que están en funcionamiento. En comparación, los PLCs ofrecen una mayor flexibilidad en cuanto a programación y actualización, permitiendo adaptaciones y modificaciones en tiempo real para ajustarse a diferentes procesos y requisitos industriales [10].

### 2.3.3 HMI

La Human-Machine Interface (HMI) es un componente esencial en muchos sistemas industriales, ya que permite la interacción directa entre el usuario y las máquinas o sistemas automatizados. Se refiere a un panel o pantalla que facilita la comunicación con una máquina, software o sistema, mostrando datos en tiempo real y permitiendo el control a través de una interfaz gráfica [11].

Es decir, la HMI es el medio a través del cual los operarios pueden monitorear y controlar las operaciones de una máquina o sistema. Por ejemplo, en una fábrica, un HMI podría mostrar qué equipos están en funcionamiento, las condiciones actuales de producción, y permitir ajustes como cambiar la temperatura o velocidad de una máquina [11].

### 2.3.4 Tipos de válvulas

Las válvulas son dispositivos que permiten controlar el flujo de un fluido en una canalización, y pueden ser manuales o automáticas. Las válvulas manuales requieren de la intervención de

una persona para su operación, mientras que las válvulas automáticas funcionan de manera autónoma, controladas por diversos mecanismos [12].

Para el caso de las válvulas manuales, estas son accionadas por operadores humanos y pueden ser de varios tipos, entre los que se incluyen:

**Válvulas de bola o esfera:** Contienen una esfera con un orificio que regula el paso de líquidos. Son comunes para interrumpir o permitir el flujo.

**Válvulas de globo:** Diseñadas para un control preciso del caudal, especialmente cuando se requiere una estanqueidad perfecta.

**Válvulas de mariposa:** Funcionan mediante la rotación de un disco y se utilizan para abrir o cerrar el paso de líquidos.

**Válvulas de compuerta:** Usadas para flujos sin interrupciones, no son ideales para regular debido al desgaste que puede ocasionar su uso frecuente.

**Válvulas de regulación y control:** Pueden ser manuales o automáticas, y permiten controlar el flujo, presión y nivel del fluido, utilizando mecanismos como termostatos.

Aunque las válvulas manuales son comunes, en aplicaciones industriales modernas, las válvulas automáticas son preferidas por su capacidad para operar sin intervención humana, lo que ofrece varias ventajas en términos de eficiencia y seguridad [12].

Las válvulas automáticas son válvulas las cuales se accionan mediante mecanismos hidráulicos, eléctricos o neumáticos, sin necesidad de intervención manual. Estas válvulas ofrecen varias ventajas, entre las que se tienen una eficiencia mejorada, un control más preciso y una mayor seguridad debido a la eliminación de la intervención humana. Además, entre las aplicaciones que involucran el uso de válvulas automáticas se tienen industrias como petróleo y gas, manufactura, alimentaria, tratamiento de agua, farmacéutica y automotriz, donde son esenciales para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente [13].

Entre las válvulas automáticas se tienen los siguientes tipos:

**Válvulas que se accionan de manera hidráulica:** Estas válvulas se utilizan en canalizaciones de agua, industrias, e instalaciones de riego. Su funcionamiento se basa en la presión ejercida sobre un manguito o una membrana elástica, la cual es controlada por pilotos reguladores que se encargan de abrir o cerrar el flujo [12].

**Válvulas que se accionan por solenoides:** Estas son comúnmente empleadas en procesos industriales, y se utilizan para regular el flujo de fluidos mediante un dispositivo electro-mecánico. El accionamiento se realiza a través de una bobina solenoide, que permite abrir o cerrar la válvula en una de sus dos posiciones fijas. Son reconocidas por su rapidez y precisión en el control del flujo.

En términos de construcción, las válvulas solenoides pueden ser normalmente cerradas, permaneciendo cerradas cuando el solenoide no está energizado y abriéndose únicamente al aplicar energía. Además, estas también pueden ser normalmente abiertas, permaneciendo abiertas en estado no energizado y cerrándose solo al aplicar energía. También existen válvulas de acción múltiple, que combinan características de los tipos anteriores, ofreciendo flexibilidad adicional para satisfacer diversas necesidades.

Respecto a su forma, las válvulas solenoides se dividen en varios tipos. Las válvulas de dos vías controlan el flujo en una sola dirección, permitiendo que el fluido pase a través de una única ruta. Las válvulas de tres vías permiten cambiar el flujo entre dos caminos diferentes, proporcionando opciones para redirigir el fluido entre dos salidas posibles. Finalmente, las válvulas de cuatro vías o reversibles se utilizan en aplicaciones más complejas, ya que permiten el control de múltiples direcciones del flujo, facilitando la gestión de sistemas que requieren un control sofisticado del fluido [14].

**Válvulas motorizadas que se accionan por actuadores eléctricos:** Estas válvulas cuentan con un actuador eléctrico que controla cuándo se abre o cierra la válvula, adaptándose al motor [12].

**Válvulas motorizadas que se accionan por actuadores neumáticos:** Similar a las válvulas con actuadores eléctricos, estas válvulas utilizan aire comprimido para su accionamiento. Los actuadores neumáticos pueden ser de simple efecto (con acción a fallo) o de doble efecto [12].

### 2.3.5 Tipos de sensores

Un sensor es un dispositivo que detecta estímulos externos y los convierte en señales eléctricas que pueden ser interpretadas por sistemas electrónicos o computadoras. Estas señales se procesan para generar una respuesta específica, como por ejemplo la activación de una

válvula. Es decir, los sensores actúan como traductores que convierten diversas propiedades del ambiente, como la luz, la posición, o la temperatura, en un lenguaje que las máquinas pueden entender y utilizar [15].

Existen muchos tipos de sensores, cada uno diseñado para detectar o medir diferentes variables en su entorno. Entre los principales tipos se incluyen [15]:

- Sensores de color: Detectan la luz y la convierten en frecuencia para identificar colores
- Sensores de contacto: Detectan la posición límite de un componente mecánico
- Sensores de distancia: Miden la distancia entre dos puntos, a menudo utilizando infrarrojos.
- Sensores de humedad: Miden la humedad y temperatura del ambiente.
- Sensores de proximidad: Detectan la presencia de objetos cercanos sin contacto.
- Sensores de temperatura: Miden la temperatura ambiente.
- Sensores de posición: Determinan la ubicación precisa de un objeto.

Ahora, en este proyecto se enfocará más en los sensores de proximidad, ya que son los más relevantes para detectar la presencia de objetos, en este caso, galones de dulce de leche, sin necesidad de contacto físico. Los sensores de proximidad son ampliamente utilizados en diversas aplicaciones industriales y tecnológicas para detectar la presencia o ausencia de objetos cercanos. A continuación se presentan los principales tipos de sensores de proximidad que existen [16]:

- Sensores inductivos: Utilizan un campo electromagnético generado por un circuito oscilante para detectar piezas metálicas cercanas. Son robustos y resistentes en entornos hostiles, aunque su alcance es limitado a unos 80 mm y solo detectan objetos metálicos.
- Sensores capacitivos: Funcionan de manera similar a los inductivos pero pueden detectar todo tipo de materiales, incluyendo líquidos y sólidos no metálicos. Son útiles en la detección de nivel y pueden funcionar a través de paredes no metálicas, aunque tienen un alcance más bajo, de menos de 60 mm.

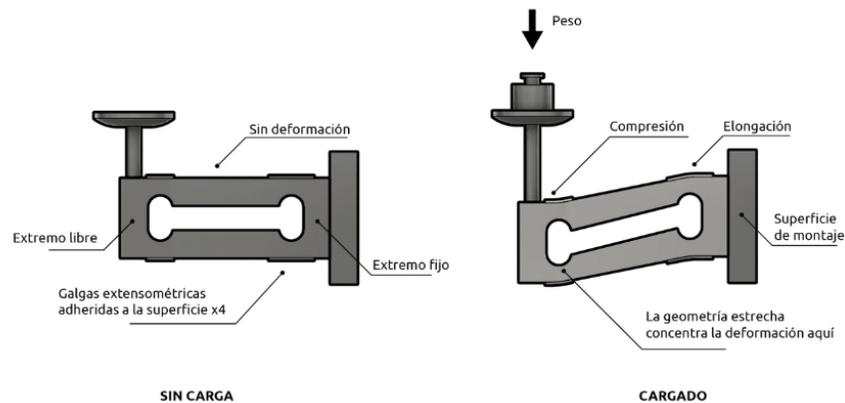
- Sensores por ultrasonidos: Emplean ondas ultrasónicas para detectar objetos y medir distancias. Pueden detectar una amplia gama de materiales a distancias de varios metros, aunque son sensibles a corrientes de aire y variaciones de temperatura.
- Sensores fotoeléctricos: Basados en un principio óptico, detectan objetos cuando un haz de luz es interrumpido. Son efectivos en la detección a larga distancia y pueden manejar objetos translúcidos o reflectantes, aunque su desempeño puede verse afectado por la suciedad en el entorno.

### 2.3.6 Celda de carga

Las celdas de carga son sensores electromecánicos ampliamente utilizados en la medición de fuerza y peso. Su funcionamiento se basa en la relación entre una fuerza aplicada, la deformación del material y la variación del flujo eléctrico. A pesar de su diseño simple, son dispositivos altamente efectivos que ofrecen precisión y robustez en una amplia gama de aplicaciones industriales y comerciales. A continuación se presenta una serie de pasos de cómo es el funcionamiento de estas celdas de carga [17]:

1. Aseguramiento de la Celda de Carga: Normalmente un extremo de la celda de carga se asegura a un marco o base fija, mientras que el otro extremo queda libre para conectarse al objeto cuya fuerza o peso se desea medir.
2. Aplicación de la Fuerza: Cuando se aplica una fuerza al cuerpo de la celda de carga, este se flexiona ligeramente bajo la tensión.
3. Flexión Proporcionada: La cantidad de flexión es directamente proporcional a la magnitud de la fuerza aplicada; una fuerza mayor provoca una mayor deformación.
4. Detección de la Deformación: A pesar de que la deformación es casi imperceptible, esta es detectada por galgas extensiométricas adheridas al cuerpo de la celda de carga.
5. Medición de la Deformación: Las galgas extensiométricas registran la deformación alterando su resistencia eléctrica en proporción a la carga aplicada. Esta variación en la resistencia se traduce en una medida precisa de la fuerza o peso.

A continuación en la figura 2.1 se muestra el funcionamiento de un tipo de celda de carga, y cómo es la lógica detrás del funcionamiento de estas.



**Figura 2.1:** Funcionamiento de las celdas de carga. [17]

Existen varios tipos de celdas de carga, donde cada una se adapta a distintas aplicaciones. A pesar de que su tecnología es la misma, su diseño y configuración pueden variar según el uso específico. Las principales categorías de celdas de carga son [17]:

- Celda de carga de viga: Estos sensores son muy versátiles y funcionan generalmente como voladizos con un extremo fijo, permitiendo que el otro se desvíe bajo la aplicación de una fuerza. También existen versiones de viga doble, donde ambos extremos están fijados y la carga se aplica en el centro.
- Celda de carga de punto único: Estas celdas están diseñadas para que la fuerza aplicada pueda ser descentralizada sin pérdida de precisión, lo que las hace ideales para aplicaciones donde la carga no siempre se aplica en el centro.
- Celda de carga de compresión: Estas celdas miden fuerzas de compresión, y su diseño, similar a una columna, les permite soportar altas capacidades en aplicaciones estáticas.
- Celda de carga de tensión: Estas celdas están diseñadas para medir fuerzas de tracción, con la carga suspendida del sensor, causando su estiramiento. A menudo tienen una forma de "S", lo que les permite medir también fuerzas de compresión, incrementando su versatilidad.

## 2.4 Control automático

Un sistema de control automático es un conjunto de técnicas y herramientas diseñadas para mantener una condición física o una cantidad medible en un valor deseado. Esto se logra a través de la medición instantánea de la variable a controlar, comparándola con un valor de referencia o patrón, y realizando una acción correctiva para ajustar la variable medida al valor deseado. Este proceso de monitoreo y ajuste continuo es la base que permite a los sistemas industriales operar con alta precisión y eficiencia. Entre las aplicaciones industriales en donde se hace uso de control automático se encuentran las industrias de transporte, alimentarias, médicas, entre otras [18].

Existen dos tipos principales de sistemas de control automático. El primero es el control a lazo abierto, donde la operación se lleva a cabo sin retroalimentación, lo que significa que la salida no influye en la entrada, y el sistema sigue un conjunto predeterminado de instrucciones sin realizar ajustes en tiempo real. El segundo es el control a lazo cerrado, también conocido como control realimentado, en el cual el sistema ajusta continuamente su salida en función del error detectado, es decir, la diferencia entre el valor deseado y el valor real medido. Este tipo de control es más preciso y adaptable, ya que permite corregir desviaciones de manera automática [18].

El proceso de diseño de control comienza definiendo los requisitos de rendimiento. Los principales parámetros a considerar son: el tiempo de incremento, que mide cuánto tarda el sistema en alcanzar del 10% al 90% de su valor final; el sobreimpulso, que es el porcentaje en que la variable excede su valor final; el tiempo de estabilización, que mide cuánto tarda en mantenerse dentro de un margen del valor final; y el error de estado estable, que es la diferencia final entre la variable del proceso y el punto de referencia [19]. En la figura 2.2 se muestra de manera gráfica estos parámetros mencionados.

Para llevar a cabo el control automático de manera eficiente, es necesario utilizar algoritmos que permitan ajustar y mantener las variables dentro de los parámetros deseados. Uno de los algoritmos más utilizados en la industria para este propósito es el control PID, del cual se hablará a continuación.

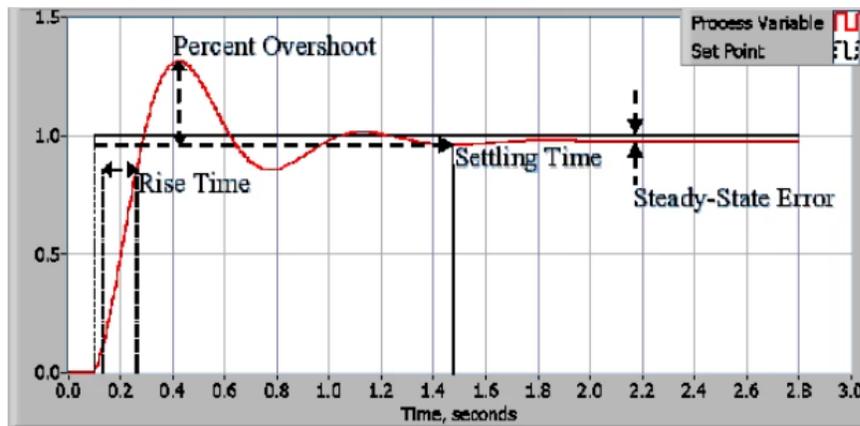


Figura 2.2: Parámetros a tomar en cuenta para control automático. [19]

### 2.4.1 Controlador PID

Los controladores PID son de los algoritmos más utilizados para control automático en la industria debido a su rendimiento robusto en diversas condiciones operativas y su simplicidad funcional. El control PID se basa en tres coeficientes: proporcional, integral y derivativo, que ajustados correctamente logran una respuesta óptima del sistema. En un sistema de control de lazo cerrado, el sensor mide la variable del proceso, que para el presente proyecto es el peso, y proporciona retroalimentación para ajustar la salida del actuador. El objetivo es minimizar el error entre el valor medido y el punto de referencia [19].

Para el caso de la componente proporcional de este controlador, esta depende únicamente de la diferencia entre el punto de referencia y la variable del proceso que se busca controlar, lo que se conoce como el error. Luego, la componente integral acumula el error a lo largo del tiempo con el fin de eliminar el error de estado estable. Finalmente, la componente derivativa evalúa la tasa de cambio del error, anticipando su comportamiento futuro según su tendencia actual [19].

### 2.4.2 Función de transferencia

Como último concepto importante para un mejor entendimiento del funcionamiento de un controlador PID y del control automático en general, se tienen las funciones de transferencia. Una función de transferencia es una representación matemática que describe la relación entre la entrada y la salida de un sistema dinámico en el dominio de la frecuencia. Específicamente,

se expresa como una fracción en la que el numerador representa el comportamiento de la salida y el denominador el de la entrada, en función de la variable compleja  $s$  [20].

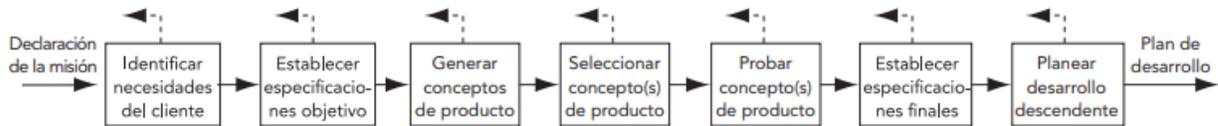
Matemáticamente, la función de transferencia se deriva a partir de las ecuaciones diferenciales que describen el sistema, transformando estas ecuaciones al dominio de Laplace. Sin embargo, una función de transferencia también se puede obtener de manera experimental, midiendo cómo una variable de salida responde ante diferentes entradas al sistema. Al registrar cómo varía la salida en función del tiempo, es posible aplicar técnicas de identificación de sistemas para ajustar la relación entre la entrada y la salida del sistema [20].

Al conocer esta relación entre la entrada y la salida del sistema, se pueden diseñar controladores, como el PID que se mencionó anteriormente, que ajusten los parámetros necesarios para obtener una respuesta óptima. Por ejemplo, si se desea calcular la función de transferencia de un ventilador industrial, se puede medir cómo varía la velocidad del ventilador en intervalos regulares de tiempo después de un cambio en la entrada, que normalmente es un escalón (por ejemplo, encender el ventilador). Estos datos permiten ajustar un modelo matemático que describe la relación entre la entrada y la velocidad real del ventilador, proporcionando así una función de transferencia que representa el comportamiento del sistema.

# Capítulo 3

## Metodología

En respuesta a los desafíos identificados en el proceso actual de llenado manual de galones de dulce de leche, esta sección del documento plantea una solución siguiendo los pasos de una metodología de diseño específica. En este caso, para llevar a cabo la resolución del problema se utiliza como guía la metodología de Ulrich y Eppinger, cuyas etapas se presentan en la figura 3.1 [21].



**Figura 3.1:** Etapas de la metodología de Ulrich Eppinger. [21]

Dado que los alcances planteados para este proyecto se limitan a la validación conceptual, se desarrolla hasta la etapa de prueba de concepto, garantizando que la solución propuesta sea no solamente factible, sino también efectiva.

A continuación se presenta una breve descripción de cada una de estas etapas, para tener un mejor entendimiento de los pasos a seguir para así obtener una propuesta de solución óptima.

- **Identificación de necesidades del cliente:** Esta primera fase de la metodología de Ulrich Eppinger se centra en comprender a fondo las necesidades y expectativas del cliente. En este contexto, se llevaron a cabo entrevistas con el asesor de la empresa

para conocer de manera específica sus requisitos. Este proceso permitió identificar los desafíos específicos asociados al llenado manual de galones de dulce de leche y definir claramente los requisitos y preferencias que deben ser abordados en la solución propuesta [21].

- **Establecimiento de especificaciones:** Al diseñar un producto, es necesario garantizar que se cumple con las necesidades definidas por el cliente en la fase anterior. Debido a esto, en esta fase se plantean métricas y valores objetivo para así lograr medir y cuantificar si el producto implementado cumple con lo deseado por el cliente. A esto se le conoce como especificaciones y están elaboradas con base en el criterio ingenieril del estudiante y fuentes bibliográficas [21].
- **Generación de conceptos:** Para la etapa de generación de conceptos, se debe de realizar la exploración de diversas soluciones para garantizar que todas las necesidades del cliente están siendo cubiertas y que se está cumpliendo con las especificaciones establecidas. Inicialmente en esta etapa se realiza una descomposición funcional del problema, y una vez se tienen los subproblemas bien definidos, se lleva a cabo el proceso tanto de búsqueda interna como externa para cada uno de estos subproblemas. Entre los métodos que existen de búsqueda se tienen la lluvia de ideas y la investigación en fuentes bibliográficas [21].
- **Selección de conceptos:** En esta fase se establecen criterios de selección los cuales están basados en las necesidades planteadas por el cliente. Estos criterios facilitan el proceso de filtrado para así llegar a seleccionar un concepto ganador. Este proceso de filtrado implica darle peso a cada uno de los criterios, y el concepto cuya calificación sea más alta, es el escogido como ganador [21].
- **Evaluación y prueba de concepto:** Finalmente, en esta etapa se lleva a cabo la validación de la solución propuesta mediante una prueba de concepto. Esta prueba permite evaluar la viabilidad técnica y funcional del sistema diseñado, asegurando que cumple con los requisitos establecidos y que puede resolver efectivamente los problemas identificados [21].

## 3.1 Identificación de necesidades del cliente

La fase de identificación de necesidades se dividió en tres partes principales: la sección de entrevistas, la sección de jerarquización de necesidades y la sección de encuesta al cliente.

### 3.1.1 Entrevista con el cliente

Para la primera etapa se llevó a cabo dos entrevistas con el asesor de la empresa Manrique Ortiz, quien en este caso es el cliente del proyecto. La primera entrevista se enfocó en identificar y comprender en detalle las necesidades y expectativas del cliente. En la segunda entrevista, se revisaron los resultados de la primera y se clarificaron aspectos que no habían quedado del todo definidos, asegurando así que todas las especificaciones y requerimientos estuvieran completamente alineados con las expectativas del cliente. En la tabla 3.1 se muestra de forma resumida las necesidades identificadas después de estas entrevistas.

**Tabla 3.1:** Necesidades interpretadas posteriores al proceso de entrevistas.

Número de necesidad	Necesidad
1	El SD debe garantizar precisión y consistencia en el peso del llenado.
2	El SD debe asegurar que cada galón se llene con la misma cantidad exacta de producto.
3	El SD debe ser capaz de llenar los galones con una variación mínima en el peso.
4	El SD debe asegurar que todos los galones estén llenados de manera uniforme para evitar reclamos de clientes.
5	El SD debe ser fácil de usar y debe de reducir los errores de peso actuales.
6	El SD debe ser capaz de operar a una velocidad que permita cumplir con los tiempos de producción requeridos.
7	El SD debe ser construido con materiales que faciliten la limpieza y el mantenimiento regular.
8	El SD debe ser capaz de permitir al usuario ajustar pesos dentro del rango especificado con alta precisión.
9	El SD debe incluir una interfaz que permita configurar manualmente el peso objetivo para cada galón.
10	El SD debe operar con energía eléctrica.
11	El SD debe requerir un mantenimiento mínimo y de fácil realización.
12	El SD debe ser capaz de llenar cada galón en un tiempo máximo de 15 segundos para cumplir con los requisitos de producción.
13	El SD debe incluir control automático para mantener una precisión constante en el peso de llenado y ajustar el flujo del producto en tiempo real.
14	El SD debe tener un botón de emergencia y un botón de inicio.
15	El SD debe ser capaz de detectar la presencia del galón antes de iniciar el llenado.

### 3.1.2 Jerarquización de necesidades

Para la segunda parte de la fase de identificación de necesidades, se procedió a categorizar las necesidades de la parte anterior en primarias y secundarias. Para esta jerarquización, se realizó una clasificación de necesidades en diversas categorías, agrupando aquellas con características comunes. Esta jerarquización se presenta a continuación:

1. El SD debe garantizar precisión y consistencia en el peso del llenado
  - 1.1. El SD debe asegurar que cada galón se llene con la misma cantidad exacta de producto.
  - 1.2. El SD debe ser capaz de llenar los galones con una variación mínima en el peso.
  - 1.3. El SD debe asegurar que todos los galones estén llenados de manera uniforme para evitar reclamos de clientes.
  - 1.4. El SD debe ser fácil de usar y debe de reducir los errores de peso actuales.
2. El SD debe ser capaz de operar a una velocidad que permita cumplir con los tiempos de producción requeridos.
3. El SD debe ser capaz de permitir al usuario ajustar pesos dentro del rango especificado con alta precisión.
  - 3.1. El SD debe incluir una interfaz que permita configurar manualmente el peso objetivo para cada galón.
4. El SD debe operar con energía eléctrica.
5. El SD debe ser capaz de llenar cada galón en un tiempo máximo de 15 segundos para cumplir con los requisitos de producción.
6. El SD debe incluir control automático para mantener una precisión constante en el peso de llenado y ajustar el flujo del producto en tiempo real.
7. El SD debe tener un botón de emergencia y un botón de inicio.
8. El SD debe ser capaz de detectar la presencia del galón antes de iniciar el llenado.
9. El SD debe facilitar un mantenimiento y limpieza rápidos y sencillos.

- 9.1. El SD debe requerir un mantenimiento mínimo y de fácil realización.
- 9.2. El SD ser construido con materiales que faciliten la limpieza y el mantenimiento regular.

### 3.1.3 Encuesta al cliente

Para la última parte de la fase de identificación, se procedió a realizarle una encuesta al cliente, para así lograr determinar si realmente se plantearon las necesidades que el cliente tenía en mente, y darle un nivel de importancia a cada una. En esta encuesta se le solicitó al cliente que, para cada una de las funciones propuestas para el sistema a diseñar (como solución al problema de llenado de galones de dulce de leche de manera manual) por favor se indicara en una escala de 1 a 5 qué tan importante considera que es la función o necesidad planteada. La escala utilizada se muestra a continuación:

1. La función es indeseable. No consideraría una solución con esta función.
2. La función no es importante, pero no me importaría tenerla.
3. Sería bueno tener esa función, pero no es necesaria.
4. La función es altamente deseable, pero consideraría una solución sin ella.
5. La función es de importancia crítica. No consideraría una solución sin esta función.

Es importante destacar que las necesidades planteadas en esta encuesta fueron el producto final después de realizar una revisión de las necesidades planteadas en la tabla 3.1, para eliminar necesidades repetitivas o redundantes. A continuación en la tabla 3.2 se presentan las necesidades finales planteadas, y su categorización por importancia del 1 al 5 según el cliente.

**Tabla 3.2:** Clasificación de importancia de necesidades finales posterior a encuesta.

Número de Necesidad	Necesidad	Importancia
1	El SD debe asegurar que cada galón se llene con la misma cantidad exacta de producto.	5
2	El SD debe ser capaz de llenar los galones con una variación mínima en el peso.	5
3	El SD debe asegurar que todos los galones estén llenados de manera uniforme para evitar reclamos de clientes.	5
4	El SD debe ser fácil de usar y debe de reducir los errores de peso actuales.	5
5	El SD debe ser capaz de operar a una velocidad que permita cumplir con los tiempos de producción requeridos.	5
6	El SD debe incluir una interfaz que permita configurar manualmente el peso objetivo para cada galón.	4
7	El SD debe operar con energía eléctrica.	5
8	El SD debe ser capaz de llenar cada galón en un tiempo máximo de 15 segundos para cumplir con los requisitos de producción.	5
9	El SD debe incluir control automático para mantener una precisión constante en el peso de llenado y ajustar el flujo del producto en tiempo real.	4
10	El SD debe tener un botón de emergencia y un botón de inicio.	4
11	El SD debe ser capaz de detectar la presencia del galón antes de iniciar el llenado.	4
12	El SD debe requerir un mantenimiento mínimo y de fácil realización.	4
13	El SD debe ser construido con materiales que faciliten la limpieza y el mantenimiento regular.	4

## 3.2 Especificaciones del producto

### 3.2.1 Definición de métricas y valores objetivo

Una vez obtenidas las necesidades que el cliente desea solucionar, y las funciones a implementar en la solución del problema, es necesario establecer cuáles son las métricas que permiten cuantificar el cumplimiento de dichas necesidades, para así poder en etapas posteriores, delimitar las posibles soluciones al problema acorde a estas métricas. Para estas métricas planteadas, se establecieron valores marginales e ideales los cuales son los parámetros que indican el cumplimiento de dichas métricas. Es importante destacar que se asignó al menos una métrica por cada necesidad planteada, para que de esa forma, todas las necesidades fueran cubiertas y evaluables con los valores marginales e ideales establecidos. Además, para cada métrica se definieron las unidades de los valores marginales e ideales con el objetivo de brindar más claridad y evitar confusiones en relación con el sistema de unidades. Asimismo, cada métrica se categoriza con una importancia relativa, la cual se definió por la relación a las necesidades que cubre. La escala de importancia seleccionada fue de 1 a 5, donde 5 es el mayor grado de importancia y 1 el menor grado. En la tabla 3.3 se muestran las métricas planteadas junto con sus valores marginales e ideales, y demás información relevante como la necesidad a la que se asocian, y el grado de importancia relativa de cada una.

**Tabla 3.3:** Métricas y Valores Objetivo.

# Métrica	Número de Necesidad	Métrica	Importancia	Unidades	Valor Marginal	Valor Ideal
1	1,2,3,9	Precisión del llenado (desviación estándar)	5	%	$\pm 2$	0.1
2	5,8	Tiempo de llenado	5	segundos	15	$\leq 15$
3	4	Tiempo de aprendizaje	5	horas	$< 4$	$\leq 2$
4	12,13	Tiempo medio requerido de mantenimiento	4	horas/mes	$< 4$	$\leq 2$
5	12,13	Tiempo medio requerido de limpieza	4	mins	20	$< 20$
6	6	Rango de ajuste del peso objetivo	4	grs	0-5000	0-5000
7	9	Tiempo de respuesta del control	4	segundos	6	$< 6$
8	10	Tasa de éxito de los botones	4	%	$\geq 90$	100
9	11	Tasa de detección de galones	4	%	$\geq 90$	100
10	7	Funcionamiento con energía eléctrica	5	Binario	Sí	Sí

Sobre los valores marginales e ideales, la mayoría de estos se determinaron según conversaciones que se tuvieron con el cliente. Entre los valores que se determinaron por declaraciones del cliente se tiene: tiempo de llenado, tiempo de aprendizaje, tiempo medio requerido de mantenimiento, funcionamiento con energía eléctrica, tiempo medio requerido de limpieza y rango de ajuste del peso objetivo. Para el caso de la precisión del llenado, se escogió un valor de  $\pm 2\%$  de desviación estándar del peso deseado, debido a que es uno de los porcentajes más utilizados en pruebas estadísticas, además de que va de la mano con lo que se planteó en los objetivos específicos.

Luego, el valor marginal e ideal de tiempo de respuesta del control se seleccionó debido a que con éstos se asegura que el sistema pueda reaccionar con la rapidez necesaria para mantener la precisión y eficiencia del proceso de llenado. Para el caso de la tasa de éxito de los botones y la tasa de detección de galones, se definió como valor ideal un 100%, ya que se desea que el actuar de los botones y la detección de galones ocurra en todas las pruebas, sin embargo se considera como valor marginal un 90%, donde no se da una activación correcta de los botones o detección adecuada de los galones de dulce de leche en 1 de cada 10 pruebas, siendo un porcentaje todavía aceptable.

### 3.2.2 Matriz de correlación entre métricas y necesidades

Para finalizar esta fase de especificaciones del producto, se creó una matriz de correlación entre métricas y necesidades, con el propósito de proporcionar una representación visual de las métricas definidas para cada una de las necesidades. La tabla 3.4 utiliza las enumeraciones establecidas en las tablas 3.2 y 3.3 para las necesidades y métricas, respectivamente.

**Tabla 3.4:** Matriz Métricas-Necesidades.

		Métrica										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Necesidad	1	X										
	2	X										
	3	X										
	4			X								
	5		X									
	6						X					
	7											X
	8		X									
	9	X						X				
	10								X			
	11										X	
	12				X	X						
	13				X	X						

### 3.3 Generación de conceptos

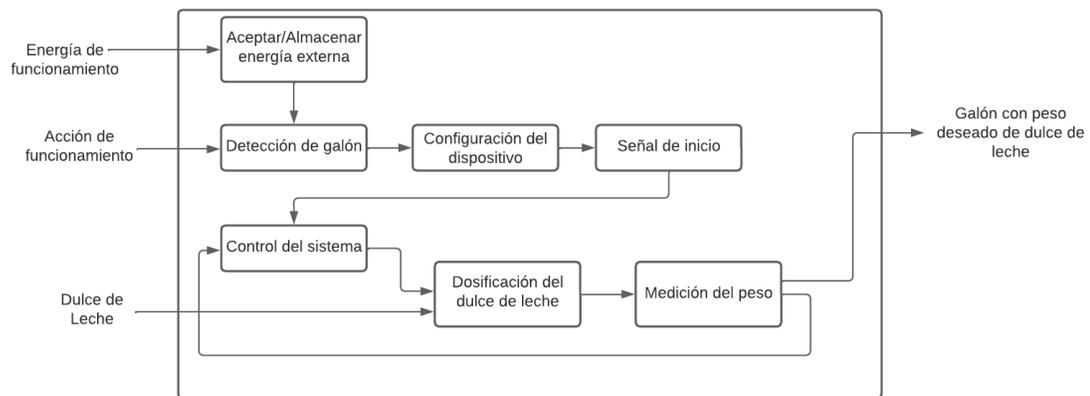
#### 3.3.1 Descomposición funcional del problema

Para iniciar la fase de generación de conceptos, es importante realizar una descomposición funcional del problema que ayuda a llevar a cabo un diseño más integral. Con esta descomposición funcional, se pueden generar soluciones específicas para cada uno de los subproblemas, reduciendo así la posibilidad de error en caso de tomar decisiones equivocadas durante la formulación del diseño. Para la descomposición funcional de este proyecto, se identificaron tres entradas principales: la energía de funcionamiento, el dulce de leche y la acción de funcionamiento. Para el caso de la salida resultante se definió que esta es el galón de dulce de leche con el peso requerido. En la figura 3.2 se presenta esta descomposición inicial, utilizando una representación de caja negra en la que se destacan únicamente las entradas y salidas del sistema.



**Figura 3.2:** Descomposición general del problema.

Ahora, para poder tener un panorama claro de todos los subproblemas presentes en este proyecto, en la figura 3.3 se presenta la descomposición funcional detallada del sistema.



**Figura 3.3:** Descomposición funcional detallada del problema.

A continuación se presenta una breve explicación de cada uno de estos subproblemas:

**Aceptar/Almacenar Energía Externa:** Este subproblema se refiere a la recepción y almacenamiento de la energía proveniente de fuentes externas necesarias para operar el sistema de automatización del llenado de galones de dulce de leche. Puede abarcar desde la conexión a la red eléctrica hasta el uso de una batería, ya que se desea que el sistema se alimente de energía eléctrica.

**Detección de Galón:** Este subproblema aborda la identificación de un galón vacío que se coloca en la posición adecuada para ser llenado. El sistema debe ser capaz de reconocer la presencia del galón antes de iniciar el proceso de llenado.

**Configuración del Dispositivo:** En este subproblema, se requiere establecer los parámetros y configuraciones iniciales del sistema para adaptarse a las especificaciones del producto y del proceso, como el peso objetivo del dulce de leche que debe ser dispensado en cada galón.

**Señal de Inicio:** Este subproblema se refiere a la activación del proceso de llenado una vez que el sistema está configurado y el galón está en la posición adecuada.

**Dosificación de Dulce de Leche:** Este subproblema se refiere al sistema que permite y controla el flujo de dulce de leche hacia el galón. Involucra los mecanismos o componentes que se encargan de abrir y cerrar el paso del dulce de leche, asegurando que el producto fluya cuando sea necesario y se detenga una vez que se haya dispensado la cantidad requerida.

**Control del Sistema:** Este subproblema trata sobre cómo el sistema regula y coordina el proceso de llenado. Implica la supervisión de las distintas variables del proceso, como el peso del dulce de leche, para asegurar que el llenado se realice de manera precisa y eficiente, según los parámetros establecidos.

**Medición del Peso:** Este subproblema se enfoca en la forma en que el sistema mide el peso del dulce de leche que ha sido dispensado en el galón. Es sumamente importante para garantizar que la cantidad de producto en el galón sea la correcta.

Una vez se tiene claro en qué consisten los subproblemas, se procede a realizar un proceso de búsqueda tanto interna como externa, para obtener ideas sobre cómo abordar cada subproblema. Este proceso busca recopilar ideas y alternativas que, en una etapa posterior, sirven para combinar conceptos y desarrollar la solución más adecuada para el proyecto.

### 3.3.2 Proceso de búsqueda interna

Para este proceso se llevó a cabo una lluvia de ideas. A continuación se presentan las soluciones obtenidas de la lluvia de ideas para cada uno de los subproblemas.

- **Aceptar/Almacenar Energía Externa**

1. Conexión a un tomacorriente
2. Uso de baterías desmontables

- **Detección de Galón**

1. Sensor de proximidad
2. Sistema de visión por computador

- **Configuración del Dispositivo**

1. Interfaz de usuario con pantalla táctil
2. Sistema de reconocimiento de voz para activar comandos

- **Señal de Inicio**

1. Botón táctil de encendido y apagado
2. Botón físico de encendido y apagado

- **Dosificación de Dulce de Leche**

1. Válvula solenoide

- **Control del sistema**

1. PLC (Controlador Lógico Programable)
2. Microcontrolador

- **Medición del peso**

1. Celdas de carga
2. Báscula electrónica conectada al sistema de control

### **3.3.3 Proceso de búsqueda externa**

Después de realizar el proceso de la lluvia de ideas, se procedió a llevar a cabo el proceso de búsqueda externa, para así abordar los diversos subproblemas utilizando una amplia gama de fuentes de información para garantizar una cobertura completa de todas las posibles soluciones. A continuación se presentan las soluciones obtenidas de este proceso para algunos de los subproblemas.

- **Aceptar/Almacenar Energía Externa**
  1. Baterías recargables por inducción
- **Detección de Galón**
  1. Sensor ultrasónico
  2. Interruptor de límite mecánico
- **Configuración del Dispositivo**
  1. Configuración mediante tarjetas de memoria preprogramadas
  2. Panel de control basado en aplicaciones móviles
- **Señal de Inicio**
  1. Sistema de iniciación por pedal
- **Dosificación de Dulce de Leche**
  1. Válvula de aguja
- **Medición del peso**
  1. Sensor de presión piezoeléctrico

### 3.3.4 Construcción de conceptos

Antes de crear las combinaciones de los subproblemas para formular los conceptos finales, se proporciona la tabla 3.5, en la que se muestran todas las opciones de soluciones a cada uno de los subproblemas que se utilizan en la combinación.

Posteriormente, aplicando el criterio ingenieril, se definieron 5 combinaciones posibles, para así en las siguientes etapas seleccionar un concepto ganador. Estas 5 combinaciones se muestran en la tabla 3.6, donde la primera fila se toma como la primera combinación y así sucesivamente.

**Tabla 3.5:** Posibles soluciones de subproblemas para la formulación de conceptos.

Aceptar/Almacenar Energía Externa	Detección de Galón	Configuración del Dispositivo	Señal de Inicio	Dosificación de Dulce de Leche	Control del Sistema	Medición del Peso
Conexión a un tomacorriente	Sensor de proximidad	Interfaz de usuario con pantalla táctil	Botón táctil de encendido y apagado	Válvula solenoide	PLC (Controlador Lógico Programable)	Celdas de carga
Uso de baterías desmontables	Sistema de visión por computador	Sistema de reconocimiento de voz	Botón físico de encendido y apagado	Válvula de aguja	Microcontrolador	Báscula electrónica conectada al sistema de control
Baterías recargables por inducción	Sensor ultrasónico	Configuración mediante tarjetas de memoria	Sistema de iniciación por pedal			Sensor de presión piezoeléctrico
	Interruptor de límite mecánico	Panel de control basado en aplicaciones móviles				

**Tabla 3.6:** Combinaciones propuestas para cada subproblema.

Aceptar/Almacenar Energía Externa	Detección de Galón	Configuración del Dispositivo	Señal de Inicio	Dosificación de Dulce de Leche	Control del Sistema	Medición del Peso
Conexión a un toma corriente	Sensor de proximidad	Interfaz de usuario con pantalla táctil	Botón físico de encendido y apagado	Válvula solenoide	PLC	Celdas de carga
Conexión a un toma corriente	Sensor ultrasónico	Interfaz de usuario con pantalla táctil	Botón físico de encendido y apagado	Válvula de aguja	PLC	Báscula electrónica
Conexión a un toma corriente	Interruptor de límite mecánico	Sistema de reconocimiento de voz	Sistema de iniciación por pedal	Válvula solenoide	Microcontrolador	Sensor de presión piezoeléctrico
Uso de baterías desmontables	Interruptor de límite mecánico	Panel de control basado en aplicaciones móviles	Botón táctil de encendido y apagado	Válvula de aguja	Microcontrolador	Sensor de presión piezoeléctrico
Conexión a un toma corriente	Sensor ultrasónico	Interfaz de usuario con pantalla táctil	Botón físico de encendido y apagado	Válvula de aguja	Microcontrolador	Celdas de carga

A continuación, se explicará el motivo de la selección de cada una de las opciones presentadas en los subproblemas listados en la tabla 3.6. Cada una de estas opciones planteadas fue considerada debido a su potencial para formar una solución robusta y efectiva dentro del proyecto de automatización del llenado de galones de dulce de leche. Es importante resaltar que, aunque todas las alternativas presentadas tienen características que las hacen viables, el proceso de selección, guiado por la metodología seguida en este proyecto de Ulrich y Eppinger [21], permite identificar la mejor solución de acuerdo con las necesidades y particularidades planteadas.

- **Aceptar/Almacenar energía externa: Conexión a un toma corriente o uso de baterías desmontables**

– *Conexión a un toma corriente:* Esta opción asegura un suministro constante de

energía, lo cual es ideal para un sistema que debe operar de manera continua o en una instalación fija. Es confiable y reduce la necesidad de reemplazar o cargar baterías, lo que simplifica el mantenimiento.

- *Baterías desmontables*: Aunque la energía eléctrica es la opción más adecuada por su disponibilidad constante en este proyecto, se decidió incluir las baterías desmontables como una alternativa viable para considerar una mayor versatilidad en el diseño del sistema. A pesar de que sólo se incluyó en una de las cinco combinaciones, no se descartó del todo, ya que permite la posibilidad de crear un sistema independiente de la red eléctrica, útil en escenarios donde se busque reducir la complejidad de instalación o simplificar el mantenimiento al evitar cables y conexiones fijas.

- **Detección de galón: Sensor de proximidad, sensor ultrasónico o interruptor de límite mecánico**

- *Sensor de proximidad*: Este tipo de sensor no requiere contacto físico con el galón y puede detectar su presencia de manera precisa. Es útil en entornos donde se requiere una detección rápida y no invasiva, asegurando que el proceso de llenado se active solo cuando el galón esté correctamente posicionado.
- *Sensor ultrasónico*: Este sensor utiliza ondas de sonido para medir la distancia al galón, lo que lo hace muy preciso y capaz de detectar galones de diferentes tamaños o materiales y en largas distancias.
- *Interruptor de límite mecánico*: Aunque es más básico y requiere contacto físico con el galón, esta opción es robusta y confiable, además de que son de menor costo.

- **Configuración de dispositivo: Interfaz de usuario con pantalla táctil (HMI), sistema de reconocimiento de voz o panel de control basado en aplicaciones móviles**

- *Pantalla táctil (HMI)*: Una interfaz de usuario con pantalla táctil ofrece una solución intuitiva y visual para configurar el dispositivo. Permite a los usuarios ajustar los parámetros del sistema de manera sencilla y directa.

- *Sistema de reconocimiento de voz*: A pesar de ser más compleja, esta opción ofrece una interfaz manos libres que puede ser especialmente útil cuando los operadores tienen las manos ocupadas o en entornos donde se busca minimizar el contacto físico con los controles.
- *Panel de control basado en aplicaciones móviles*: El uso de una aplicación móvil se tomó como una opción viable debido a sus características de configuración remota y personalizable.

- **Señal de inicio: Botón físico, botón táctil o pedal**

- *Botón físico*: Esta es una opción sencilla y robusta que ofrece una sensación de activación clara y confiable. Es especialmente útil en entornos industriales donde los operadores prefieren un control manual y tangible para iniciar el proceso.
- *Botón táctil*: Un botón táctil puede ofrecer una solución moderna y la cual reduce el desgaste mecánico y la necesidad de contacto físico directo.
- *Pedal*: El uso de un pedal permite a los operadores iniciar el proceso sin usar las manos, lo que es ventajoso en entornos donde las manos están ocupadas.

- **Dosificación de dulce de leche: Válvula solenoide o válvula de aguja**

- *Válvula solenoide*: Esta opción es ideal para un control automático, ya que puede ser abierta y cerrada rápidamente mediante señales eléctricas. Es fácil de integrar en un sistema controlado por microcontrolador o PLC, permitiendo un flujo preciso y rápido de dulce de leche.
- *Válvula de aguja*: Ofrece un control más preciso del flujo de líquido, lo que es útil en aplicaciones donde se requiere dosificación muy fina.

- **Control del sistema: PLC o microcontrolador**

- *PLC (Controlador Lógico Programable)*: Es una opción robusta y diseñada específicamente para el control industrial, con capacidad de manejar múltiples entradas y salidas de manera confiable.
- *Microcontrolador*: Se consideró la opción de un microcontrolador para este proyecto debido a su costo más bajo y flexibilidad. En la implementación real, un

microcontrolador puede ser una solución efectiva para proyectos con presupuestos ajustados y con complejidades bajas.

- **Medición de peso: Celda de carga, sensor de presión piezoeléctrico o báscula electrónica**

- *Celda de carga*: Es una solución estándar para medir el peso de manera precisa y confiable en sistemas automatizados. Las celdas de carga son fáciles de integrar y pueden ofrecer mediciones en tiempo real.
- *Sensor de presión piezoeléctrico*: Este tipo de sensor mide cambios en la presión aplicados a una superficie y puede ser utilizado para calcular el peso. Es adecuado en aplicaciones donde se busca una solución compacta y con alta sensibilidad a los cambios de presión.
- *Báscula electrónica*: Ofrece una solución directa para medir el peso de los galones, sin embargo su adaptación a entornos en donde se necesita un control es más complejo.

## 3.4 Selección de conceptos

### 3.4.1 Filtrado de conceptos

Como se mencionó previamente en este documento, el objetivo de esta etapa es seleccionar el concepto óptimo o ganador entre los cinco conceptos propuestos en la etapa anterior. Para determinar cuál de estos conceptos es el más adecuado, se estableció una lista de criterios de selección basada en las necesidades identificadas en la tabla 3.2. A continuación, se presentan los criterios de selección definidos.

- Precisión de llenado
- Facilidad de operación
- Eficiencia en el tiempo de llenado
- Compatibilidad energética
- Capacidad de detección
- Facilidad de mantenimiento y limpieza

Con base en los criterios de selección establecidos, se elaboró una matriz para filtrar las combinaciones de conceptos propuestas. En esta matriz, se definió una combinación como referencia para compararla con las demás. Cada combinación o concepto fue evaluado asignándole un símbolo (+) si superaba a la referencia en algún aspecto, un cero (0) si era comparable, y un menos (−) si la referencia mostraba mejores características. Tras completar este proceso, se analizaron los resultados para decidir cuáles propuestas serán descartadas y cuáles se mantendrán en consideración. La matriz de filtrado se presenta en la tabla 3.7.

**Tabla 3.7:** Matriz de filtrado de conceptos.

Conceptos					
Criterios de selección	1	2	3 (Referencia)	4	5
Precisión de llenado	+	+	0	−	+
Facilidad de operación	+	+	0	−	+
Eficiencia en el tiempo de llenado	0	−	0	−	−
Compatibilidad energética	0	0	0	−	0
Capacidad de detección	+	+	0	0	+
Facilidad de mantenimiento y limpieza	+	+	0	−	−
Suma +	4	4	0	0	3
Suma 0	2	1	6	1	1
Suma −	0	1	0	5	2
Evaluación Neta	4	3	0	-5	1
Lugar	1	2	4	5	3
¿Continuar?	Sí	Sí	No	No	Sí

### 3.4.2 Selección del candidato ganador

Tras completar la etapa de filtrado, se procede a la selección final del candidato ganador. En esta fase, se utiliza el mismo método de evaluación basado en los criterios de selección previamente establecidos, pero ahora se asigna un peso porcentual a cada criterio según su relevancia. Esto quiere decir que si se considera que un criterio de selección está asociado a una necesidad sumamente importante para el cliente, se debe de asignar un peso porcentual elevado a dicho criterio. Para esta selección, al igual que en la etapa de filtración, se definió

una combinación como la referencia, y se estableció la escala que se presenta a continuación para medir las otras combinaciones respecto a esta referencia:

1. Es notablemente inferior que la referencia.
2. Es ligeramente inferior que la referencia.
3. Es la referencia
4. Es ligeramente superior que la referencia.
5. Es notablemente superior que la referencia.

En la tabla 3.8 se muestra la selección de los pesos de los criterios de selección. Para evitar la asignación arbitraria o subjetiva de pesos, se asignó un valor del 1 al 5 a cada criterio, donde un valor más alto representa una mayor importancia del criterio. Luego, estos valores se ponderaron para determinar el peso relativo de cada criterio.

**Tabla 3.8:** Peso de los criterios.

Criterios de selección	Peso absoluto	Peso relativo
Precisión de llenado	5	22%
Facilidad de operación	4	17%
Eficiencia en el tiempo de llenado	4.5	19%
Compatibilidad energética	3.5	14%
Capacidad de detección	3.5	14%
Facilidad de mantenimiento y limpieza	3.5	14%

Ahora bien, en la tabla 3.9 se muestra la matriz para la evaluación y selección del concepto final o ganador.

**Tabla 3.9:** Tabla de Evaluación de Conceptos.

Criterios de selección	Peso	Conceptos					
		A		B (REF)		C	
		Calificación	Ponderado	Calificación	Ponderado	Calificación	Ponderado
Precisión de llenado	22%	5	1.1	3	0.66	4	0.88
Facilidad de operación	17%	3	0.51	3	0.51	3	0.51
Eficiencia en el tiempo de llenado	19%	4	0.76	3	0.57	2	0.38
Compatibilidad energética	14%	3	0.42	3	0.42	3	0.42
Capacidad de detección	14%	4	0.56	3	0.42	3	0.42
Facilidad de mantenimiento y limpieza	14%	4	0.56	3	0.42	3	0.42
<i>Total</i>	100%	3.91		3		3.03	
<i>Lugar</i>		1		3		2	
<i>¿Continuar?</i>		Desarrollar		No		No	

Al analizar los resultados, se obtiene que la combinación ganadora consta de:

- Aceptar/Almacenar Energía Externa: Conexión a toma corriente
- Detección de Galón: Sensor de proximidad
- Configuración del Dispositivo: Interfaz de usuario con pantalla táctil
- Señal de Inicio: Botón físico de encendido y apagado
- Dosificación de Dulce de Leche: Válvula solenoide
- Control del Sistema: PLC
- Medición del Peso: Celdas de carga

Una vez seleccionado el concepto ganador, en la sección de la propuesta de diseño se proporciona una explicación detallada de las razones por las cuales se eligió esta opción como la más adecuada para el proyecto, así como un desglose de los componentes específicos seleccionados.

### 3.5 Pruebas de validación de concepto

Una vez que se ha identificado el concepto ganador en la etapa anterior, se procede a la etapa final de la metodología en la cual se plantean las pruebas de validación que se deben

realizar para confirmar que el sistema diseñado cumple con las métricas establecidas y que las soluciones propuestas son efectivas para abordar las necesidades y requerimientos del proyecto.

En este caso, se han definido 4 pruebas de modo que se abarca la totalidad de las métricas y necesidades planteadas. A continuación se presenta la descripción de las pruebas de validación, junto con las métricas que cada una de estas pruebas permiten medir.

### **3.5.1 Prueba 1: Evaluación de precisión y configuración de peso**

En esta prueba se evalúa la capacidad del sistema para llenar galones con la cantidad precisa de dulce de leche, y se verifica el rango de ajuste del peso objetivo que el usuario puede seleccionar. Se desarrolla una prueba de concepto utilizando un microcontrolador (Arduino) que integra los componentes necesarios para simular el sistema de control del proceso de llenado. Se hace uso de un microcontrolador, ya que la empresa no dispone de un PLC. Se realizan 30 ciclos de llenado, siguiendo los principios de la teoría de R&R, para asegurar la repetibilidad y reproducibilidad de los resultados.

Durante cada ciclo, el usuario puede seleccionar un peso objetivo de las opciones disponibles (en este caso, no se utilizan pesos de 5 kilos debido a que es una prueba de concepto). Después de cada llenado, se mide el peso del galón utilizando celdas de carga. Esta prueba permite evaluar la precisión del llenado al medir la desviación estándar del peso dosificado, y si el sistema logra alcanzar los pesos seleccionados por el usuario dentro del rango de ajuste establecido.

Métricas evaluadas:

- Precisión del llenado (desviación estándar)
- Rango de ajuste del peso objetivo

### **3.5.2 Prueba 2: Interacciones del usuario y detección**

En esta prueba se evalúa la capacidad del sistema para detectar la presencia de galones vacíos, la tasa de éxito de los botones y el tiempo de aprendizaje requerido para que los usuarios comprendan y operen el sistema de manera efectiva. Para llevar a cabo esta prueba, se

utiliza la prueba de concepto mencionada en la prueba 1, que incluye un microcontrolador (Arduino) junto con los componentes necesarios para simular el sistema de control del proceso de llenado.

Se colocan galones frente al sensor de proximidad repetidas veces para determinar cuántas veces el sistema los detecta correctamente, lo que permite calcular la tasa de detección de galones. Además, se evalúa la tasa de éxito al presionar los botones para iniciar y detener el proceso de llenado, registrando cuántas veces el sistema responde adecuadamente al comando del usuario. Finalmente, se analiza el tiempo de aprendizaje necesario para que los operadores entiendan cómo configurar y operar el sistema. Los usuarios reciben instrucciones sobre el uso del sistema, y se mide el tiempo que les toma familiarizarse con las funciones básicas y operar el sistema de manera autónoma.

Métricas evaluadas:

- Tasa de detección de galones
- Tasa de éxito de los botones
- Tiempo de aprendizaje

### **3.5.3 Prueba 3: Evaluación del mantenimiento y limpieza del sistema**

En esta prueba, se evalúa el tiempo requerido para realizar las tareas de mantenimiento y limpieza del sistema, utilizando la prueba de concepto desarrollada con Arduino y los componentes clave del proceso de llenado. Aunque no se cuenta con un PLC ni el sistema completo, esta prueba permite simular aspectos importantes del mantenimiento y la limpieza en un entorno controlado.

Para el mantenimiento, los operadores se enfocan en evaluar el tiempo necesario para revisar y ajustar conexiones, sensores, y otros componentes presentes en la prueba de concepto. También se evalúa el proceso de reemplazo de piezas, registrando el tiempo necesario para completar estas tareas. En cuanto a la limpieza, se aborda la limpieza de los conductos y partes móviles del sistema que entren en contacto con el dulce de leche. Se toma en cuenta el tiempo requerido para desmontarlas, limpiarlas y volver a montarlas.

Métricas evaluadas:

- Tiempo medio requerido para el mantenimiento.
- Tiempo medio requerido para la limpieza.

### **3.5.4 Prueba 4: Evaluación del tiempo de respuesta de control**

En esta prueba, se simularán en software tanto el tiempo de respuesta del sistema como el tiempo de llenado. Se implementará un controlador PID, seleccionado por su robustez en la gestión del control del proceso. La simulación permitirá medir el tiempo necesario para que el sistema alcance el estado estable tras el inicio del control, así como el tiempo total requerido para llenar el galón

Métricas evaluadas:

- Tiempo de respuesta del control
- Tiempo de llenado

Para el caso de la métrica de funcionamiento con energía eléctrica, dado que esta métrica es binaria, no se realizan pruebas específicas, ya que todos los elementos de solución propuestos cumplen con este criterio. La evaluación de esta métrica se basa en la capacidad de los componentes para operar correctamente bajo alimentación eléctrica, lo cual está garantizado para la solución ganadora seleccionada.

# Capítulo 4

## Propuesta de diseño

En este capítulo se presenta la propuesta de diseño de la combinación ganadora obtenida en el capítulo anterior para el sistema automatizado de llenado de galones de dulce de leche. La propuesta incluye un diagnóstico detallado del proceso actual, los componentes necesarios, y cómo estos se integran al entorno actual de la planta. Además, se incluye la descripción de la solución de control automático propuesta, y la lógica de programación del PLC que fue seleccionado como parte de la metodología de diseño.

### 4.1 Diagnóstico del proceso actual

Con el fin de comprender a fondo el proceso actual de llenado de galones de dulce de leche en la planta, se realizó una visita a la empresa donde se llevó a cabo una recolección de información y datos relevantes. A continuación, se presenta un resumen de los aspectos más importantes del proceso, identificando tanto las prácticas actuales como las áreas clave de mejora que guiarán la propuesta de diseño.

- **Descripción del Proceso Actual:** Actualmente, el proceso de llenado de galones de dulce de leche en la planta es completamente manual. Los ingredientes del dulce de leche se mezclan en una mezcladora, y luego el producto es transferido a una marmita a través de una bomba. La marmita cuenta con una abertura en la parte inferior que se controla mediante una llave manual. El dulce de leche cae por gravedad desde la marmita hacia los galones, y el operario es responsable de abrir y cerrar la llave para

regular la cantidad de producto que se dispensa. Este proceso se basa exclusivamente en la estimación visual del trabajador, ya que no se utilizan pesas ni otros instrumentos de medición para garantizar la cantidad exacta de producto en cada galón. Cabe destacar que se hace uso de una mesa que se encuentra debajo de la marmita en donde se colocan los galones para el llenado del producto.

- **Metodología de Llenado:** El llenado de los galones se realiza de manera totalmente manual, utilizando únicamente la llave manual para abrir y cerrar el paso del dulce de leche. No se emplea ninguna herramienta adicional ni tecnología de medición en este proceso.
- **Tiempos de Operación:** El tiempo necesario para llenar un galón de 5 kg oscila entre 7.5 y 9.5 segundos. Este tiempo se mantiene relativamente constante entre cada llenado y no se han identificado grandes variaciones en la duración del proceso.
- **Inconsistencias Observadas:** El principal problema identificado en el proceso actual es el sobrellenado constante de los galones. Dado que no se utiliza ningún método de medición precisa, el operario tiende a sobrellenar los galones para evitar quejas de los clientes por recibir cantidades insuficientes. Esta práctica manual de sobrellenado resulta en pérdidas económicas significativas debido al desperdicio de producto. Se ha observado que, en promedio, cada galón contiene aproximadamente 100 gramos más de producto del necesario.
- **Condiciones de Trabajo:** El personal involucrado en el proceso de llenado debe concentrarse en abrir y cerrar la llave manual con precisión, lo que genera cansancio físico y mental. Esta tarea repetitiva puede ser agotadora, especialmente debido a la necesidad de calcular visualmente la cantidad de producto en cada galón.
- **Eficiencia y Productividad:** La eficiencia del proceso es considerada normal, sin que se identifiquen cuellos de botella en la operación. Mientras un trabajador llena un galón, otro se encarga de colocarle la tapa y prepararlo para su posterior distribución. Sin embargo, la velocidad a la que el dulce de leche es dispensado desde la marmita es un factor crítico, ya que un llenado lento podría causar el enfriamiento y endurecimiento del producto, lo cual podría obstruir el contenedor y afectar la calidad del dulce de leche.

- **Áreas de Mejora Identificadas:** El área de mejora principal, y en la que se enfoca este proyecto, es la de asegurar un llenado preciso de los galones de dulce de leche basado en el peso, en lugar de la estimación visual.
- **Recolección de Datos:** Los datos recopilados indican que el llenado de un galón de 5 kg toma entre 7.5 y 9.5 segundos. En prácticamente todos los casos, los galones se sobrellenan con aproximadamente 100 gramos adicionales. Dado que el proceso depende totalmente de la habilidad visual del operario, los errores son frecuentes y se producen en casi todos los llenados. Además, el dulce de leche en los primeros 25-30 minutos del proceso se encuentra a una temperatura de aproximadamente 80 grados Celsius. También, el orificio por el que sale el dulce de leche tiene un diámetro de dos pulgadas.
- **Tecnología y Equipos Actuales:** Actualmente, no se utiliza tecnología en el proceso de llenado, ni siquiera una pesa, ya que se considera que esto tomaría demasiado tiempo para el personal. El proceso depende exclusivamente de la experiencia y la estimación visual de los trabajadores.
- **Requerimientos de Producción:** La planta produce 375 galones de dulce de leche de 5 kg cada día, distribuidos en 5 tandas de 75 galones cada una. Cada tanda corresponde a una marmita llena, y el proceso se repite cinco veces al día.

Finalmente, para ofrecer una idea más clara de cómo se encuentra el proceso actual, se presenta en la figura 4.1 una imagen de la configuración actual en donde se realiza el llenado de dulce de leche. Además, en la figura 4.2 se muestra una imagen tomada durante el proceso manual de llenado, con el fin de ilustrar las condiciones y el procedimiento que se sigue actualmente.



**Figura 4.1:** Configuración actual del llenado manual de galones de dulce de leche.



**Figura 4.2:** Proceso actual del llenado de galones de dulce de leche.

## 4.2 Escogencia de componentes para el diseño

En esta sección se presenta un análisis detallado de cada uno de los componentes seleccionados para el sistema automatizado de llenado de galones de dulce de leche. Aunque la selección se basó en los resultados de la evaluación comparativa descrita en la metodología,

aquí se justificará tanto la elección técnica y funcional de cada componente dentro del sistema propuesto, como el modelo específico a utilizar.

### 4.2.1 Conexión a Toma Corriente (para Aceptar/Almacenar Energía Externa)

**Especificaciones Técnicas:** La conexión eléctrica seleccionada para el sistema se basa en el uso de energía eléctrica de la planta, con un requerimiento de voltaje de 120V 60 Hz, que es el estándar en las instalaciones de la empresa y en Costa Rica [22]. Además, las clavijas a utilizar son de tipo B. Estas especificaciones permiten alimentar tanto al PLC como a los otros componentes eléctricos, incluyendo la válvula solenoide y la interfaz de usuario.

**Justificación:** La elección de energía eléctrica como fuente de energía para el sistema responde directamente a las necesidades y especificaciones del cliente. En la planta ya se dispone de un suministro confiable de energía eléctrica, lo que facilita la integración del sistema sin requerir adaptaciones o inversiones adicionales en infraestructura energética. Además, el uso de electricidad permite una alimentación más eficiente y segura del PLC, que a como se vio en la sección anterior de la metodología, es el componente encargado de la coordinación de todo el sistema automatizado. Esta solución también se tomó como ganadora debido a la compatibilidad con los demás elementos seleccionados, como la válvula solenoide y los sensores, que dependen de una fuente de energía estable para su correcto funcionamiento.

### 4.2.2 Sensor de Proximidad (para Detección de Galón)

**Especificaciones Técnicas:** El sensor de proximidad seleccionado es el modelo LJC18A3-H-Z/BX, un sensor capacitivo de 18 mm de diámetro diseñado para detectar tanto materiales metálicos como no metálicos, como plástico, agua, vidrio, y aceite. Este sensor cuenta con un rango de detección ajustable de hasta 10 mm, una salida normalmente abierta, y opera con una tensión de alimentación de 6 a 36V DC, lo que lo hace compatible con una amplia variedad de sistemas industriales, incluidos PLCs los cuales forman parte de la solución propuesta [23].

**Justificación:** Este sensor se seleccionó debido a su capacidad para detectar materiales plásticos de forma precisa y sin contacto físico, lo cual es crucial dado que los galones a detectar son de plástico. Comparado con otros tipos de sensores, como los sensores inductivos que solo detectan materiales metálicos, o los sensores fotoeléctricos que pueden verse afectados por el color o la transparencia del objeto, el sensor capacitivo proporciona una solución más confiable y adaptable para este tipo de aplicación. Además, los sensores de proximidad capacitivos son menos propensos a ser afectados por el entorno, como puede suceder con los sensores fotoeléctricos en ambientes con polvo o humedad, donde la suciedad puede interferir con la precisión de la detección.

Este sensor al compararlo con otras opciones propuestas, se destaca como la mejor elección debido a su precisión y confiabilidad en la detección de galones de plástico. Gana en costo y simplicidad frente a la visión por computador, que resulta innecesariamente compleja para esta aplicación. A diferencia de los sensores ultrasónicos, el capacitivo ofrece una detección más precisa de materiales no metálicos sin verse afectado por condiciones ambientales. Además, al no requerir contacto físico como los interruptores mecánicos, minimiza el desgaste y el riesgo de daños en los galones, asegurando un funcionamiento más eficiente y duradero.

### 4.2.3 Interfaz de usuario con pantalla táctil(HMI) (para Configuración del Dispositivo)

**Especificaciones Técnicas:** La interfaz seleccionada es la SIMATIC HMI, KTP700 Basic model (modelo 6AV2123-2GB03-0AX0 de Siemens). Este HMI cuenta con una pantalla táctil de 7 pulgadas de diagonal, lo que permite una interacción intuitiva y fácil con el sistema. Además, dispone de 8 teclas de función programables, que ofrecen opciones adicionales para la interacción con el sistema de control sin necesidad de tocar la pantalla. La tensión de operación es de 24V DC, lo que lo hace compatible con el sistema de control y otros componentes que operan bajo este mismo voltaje. Asimismo, esta HMI es completamente compatible con cualquier PLC de Siemens, lo que garantiza una integración sin problemas con el controlador lógico programable seleccionado para este proyecto [24].

**Justificación:** El SIMATIC HMI KTP700 Basic fue seleccionado debido a su gran integración con los PLC de Siemens, lo que asegura una comunicación rápida y confiable. La

combinación de una pantalla táctil de 7 pulgadas y las teclas de función programables ofrece una interfaz de usuario flexible y versátil, permitiendo a los operarios interactuar de manera eficiente con el sistema de control. A pesar de que Siemens ofrece modelos de HMI más especializados y avanzados, los cuales incluyen pantallas más grandes o mayores capacidades de procesamiento, se determinó que las características del KTP700 Basic son más que suficientes para satisfacer las necesidades de este proyecto. La pantalla táctil de 7 pulgadas proporciona la visibilidad y espacio necesarios para mostrar datos de llenado, configuraciones y alertas, sin que sea necesaria una inversión en modelos más costosos que podrían incluir funciones no requeridas en esta aplicación específica.

#### 4.2.4 Botón físico de encendido y apagado (para Señal de Inicio)

**Especificaciones Técnicas:** El botón seleccionado para la señal de inicio es un interruptor DPST con función de ENCENDIDO/APAGADO (modelo APBB-22&25N). El botón es de auto-enclavamiento, lo que significa que, al presionar el botón, se acciona el contacto Normalmente Abierto (N.O.) para encender, y una segunda presión activa el contacto Normalmente Cerrado (N.C.) para apagar el sistema. Además, ofrece un nivel de protección IP65, soporta una corriente máxima de 10A y un voltaje de hasta 220V. El botón incluye una luz indicadora incandescente y está certificado bajo normas CE RoHS [25].

**Justificación:** Este botón fue seleccionado debido a su simplicidad, robustez y confiabilidad en aplicaciones industriales. El diseño auto-enclavado garantiza que el sistema permanezca encendido o apagado sin la necesidad de mantener la presión, lo cual es importante para evitar la fatiga del operador y asegurar la continuidad del proceso. Además, su nivel de protección IP65 lo convierte en una opción segura y confiable para entornos donde puede haber presencia de polvo o líquidos. Al igual que para el caso anterior, a pesar de que existen alternativas más avanzadas, como botones digitales o interfaces de arranque remoto, la solución con un botón físico N/O + N/C es más que suficiente para las necesidades de este proyecto. Invertir en dispositivos más complejos no aportaría beneficios significativos para esta aplicación, ya que las funciones básicas de encendido y apagado son cubiertas de manera eficiente por este dispositivo.

### 4.2.5 Válvula solenoide (para Dosificación de Dulce de Leche)

**Especificaciones Técnicas:** La válvula solenoide seleccionada es de tipo proporcional, tiene un diámetro de 2 pulgadas y está fabricada en acero inoxidable 304. Además, trabaja con una tensión de 24V DC y una señal de control de 0-10V, lo que garantiza su compatibilidad con el sistema de control del PLC. Finalmente, el modelo es de tipo normalmente cerrado (N.C.) [26].

**Justificación:** La elección de una válvula solenoide proporcional de 2 pulgadas se basa en la necesidad de que el diámetro de la válvula coincida con las salidas existentes de las marmitas, permitiendo una integración directa sin modificaciones adicionales. Además, la operación a 24V DC garantiza compatibilidad con el sistema de control automatizado, facilitando su integración y operación. La configuración de tipo normalmente cerrado (N.C.) es preferida para este proyecto, ya que proporciona un control más confiable y seguro del flujo de dulce de leche, evitando la liberación accidental del fluido cuando el sistema está inactivo. Dado que se utilizará un controlador PID en el sistema, la válvula proporcional permite una regulación precisa del flujo en función de las señales analógicas emitidas por el controlador, lo que asegura una dosificación adecuada y uniforme. Adicionalmente, esta válvula es completamente compatible con el módulo de salida analógica seleccionado para el PLC, lo que garantiza un control eficiente. Finalmente, el uso de acero inoxidable asegura una mayor durabilidad y resistencia, además de acoplarse con la normativa estipulada para sistemas relacionados con productos alimentarios.

### 4.2.6 PLC (para Control del Sistema)

**Especificaciones Técnicas:** El PLC seleccionado fue el SIMATIC S7-1200 CPU 1214C AC/DC/Relay de Siemens. Este PLC compacto tiene 14 entradas digitales (DI) de 24 V DC, 10 salidas digitales (DO) tipo relé con una capacidad de 2 A, y 2 entradas analógicas (AI) de 0-10V DC, lo que lo hace adecuado para gestionar las señales de control y monitoreo del sistema de automatización. Este PLC opera con una alimentación de 85-264 V AC a una frecuencia de 47-63 Hz, lo cual es compatible con el sistema eléctrico que se emplea para el proyecto. Este PLC es programado y configurado utilizando el software STEP 7 Basic en el entorno TIA Portal, e incluye capacidades de comunicación integradas mediante

los protocolos Ethernet, PROFINET y Modbus [27]. Además, debido a que se utilizará una válvula solenoide proporcional, que requiere de una salida analógica para su control, es necesario añadir un módulo de salida analógica. El módulo seleccionado es el SIMATIC S7-1200, Analog output, SB 1232, con 1 salida analógica (AO) de +/-10 V DC (12 bits de resolución) o 0-20 mA (11 bits de resolución), lo que permite manejar con precisión la válvula proporcional en el sistema [28].

**Justificación:** El PLC Siemens S7-1200 CPU 1214C AC/DC/Relay fue seleccionado por ser una solución óptima para cubrir todas las necesidades de control y automatización del proyecto. Una de las principales razones para elegir este modelo es que dispone de suficientes entradas y salidas (14 entradas digitales, 10 salidas de relé y 2 entradas analógicas) para satisfacer todos los requerimientos de conexión, incluyendo las celdas de carga, el botón de inicio, y otros sensores, sin requerir módulos adicionales. Además, este PLC es completamente compatible con los otros componentes del sistema, como el HMI KTP700, a través de las conexiones de PROFINET y Modbus, lo que asegura una integración eficiente y rápida. A pesar de que existen PLCs más avanzados dentro de la familia SIMATIC S7, como los modelos de la serie S7-1500, las características de este controlador son más que suficientes para manejar tanto los dispositivos de entrada y salida como la lógica de control requerida. Invertir en un modelo más avanzado implica un costo innecesario, dado que el S7-1200 proporciona el rendimiento adecuado y la flexibilidad para expandir módulos según se necesite.

### 4.2.7 Celdas de carga (para Medición del Peso)

**Especificaciones Técnicas:** La celda de carga seleccionada es de tipo barra recta, diseñada para traducir hasta 10 kg de presión en una señal eléctrica. Está construida en aleación de aluminio, lo que la hace ligera y resistente. Utiliza cuatro galgas extensométricas conectadas en un puente de Wheatstone para convertir la tensión en una señal eléctrica, lo que asegura alta precisión en la medición. La celda cuenta con un nivel de precisión del 0.02%, lo que garantiza lecturas exactas y repetibles durante el proceso de llenado. Además, tiene una protección IP65, lo que la hace resistente al polvo y a los chorros de agua, permitiendo su operación en ambientes industriales. Finalmente, esta celda de carga funciona con un voltaje de excitación recomendado de 3 a 12V DC [29].

**Justificación:** Esta celda de carga fue seleccionada debido a su capacidad para medir con precisión pesos de hasta 10 kg, lo que se ajusta a los requerimientos de peso de los galones de dulce de leche. A pesar de que el peso máximo esperado de los galones de dulce de leche es de 5 kg, se decidió sobredimensionar la celda de carga a 10 kg para evitar posibles sobrecargas o daños a largo plazo en caso de variaciones en los procesos o condiciones imprevistas, garantizando así mayor durabilidad del sistema. Además, también se seleccionó debido a su alta precisión del 0.02%, la cual asegura que el sistema pueda medir con exactitud el peso del contenido, evitando errores de dosificación. Este modelo ofrece una gran relación costo-beneficio, cubriendo todas las necesidades del proyecto sin generar un gasto innecesario. Finalmente, su diseño compacto facilita su integración en el sistema de control y su protección IP65 asegura que puede operar sin problemas en el ambiente de la planta de producción.

## 4.3 Integración de la solución en el entorno de la planta

En esta sección se describen las modificaciones necesarias a nivel de la planta para integrar la solución propuesta en el entorno de producción. Estas modificaciones incluyen el posicionamiento de sensores, acoples, y otros ajustes requeridos para la correcta implementación del sistema de control automático del llenado de galones de dulce de leche.

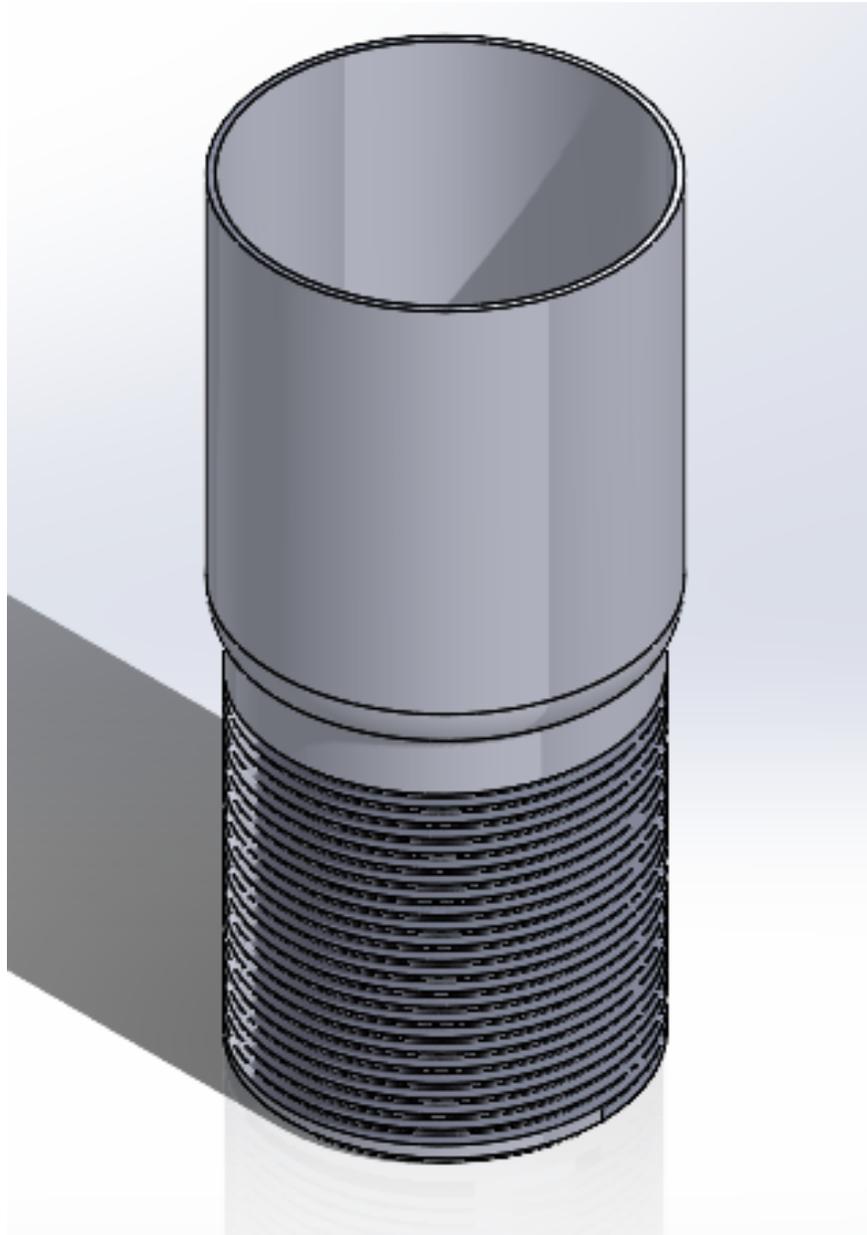
Para poder incorporar los distintos componentes mencionados anteriormente en el documento, como la celda de carga, la válvula solenoide, y otros sensores, se diseñaron varias piezas que permiten la instalación y acople adecuado de estos elementos en la planta.

Es importante destacar que la disposición de todos estos componentes se realiza sobre una mesa que ya está disponible en la empresa. Dicha mesa es el soporte central donde se colocan los sensores, actuadores, y el sistema de control. Esto permite que la integración del sistema sea más sencilla, además de que permite aprovechar lo que ya se dispone en la empresa, reduciendo costos y la necesidad de realizar grandes modificaciones estructurales.

### 4.3.1 Acople de la válvula

Se diseñó una pieza de acero inoxidable AISI 304, tal como se menciona en el marco teórico, ya que este material es ideal para aplicaciones en contacto con productos alimenticios debido

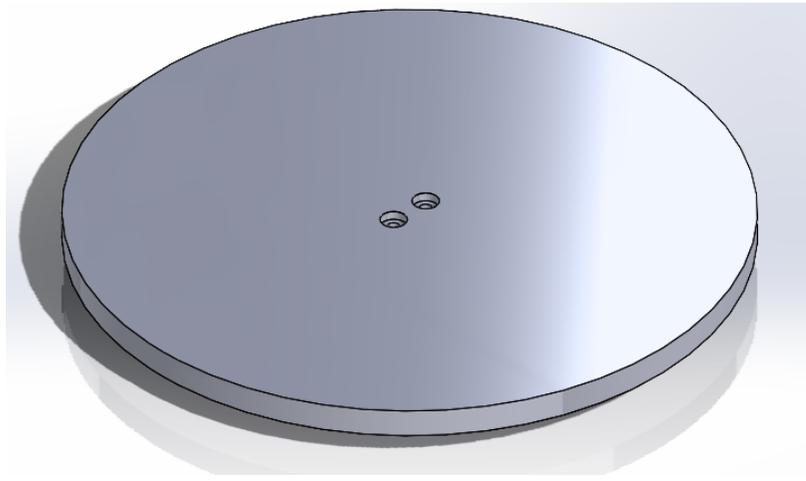
a su resistencia a la corrosión y facilidad de limpieza. La pieza tiene dos extremos: uno de ellos se conecta a la salida de la marmita, y el otro extremo cuenta con una rosca tipo NPT, compatible con la válvula que se utilizará en el sistema. Para asegurar una conexión firme y evitar fugas, se emplea una abrazadera de acero inoxidable, lo que garantiza que la unión entre el acople y la salida de la marmita quede correctamente sellada y fija. En la figura 4.3 se muestra la pieza diseñada en el software SolidWorks.



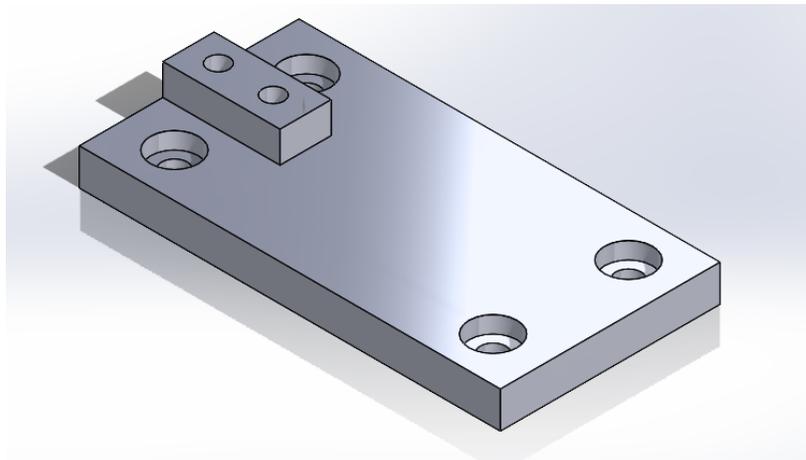
**Figura 4.3:** Diseño del acople entre la salida de la marmita y la válvula.

### 4.3.2 Incorporación de la celda de carga

El montaje de la celda de carga se realiza en dos partes: la primera consiste en fijar la celda de carga a la mesa mediante tornillos, utilizando un soporte diseñado con una ligera elevación que permite que la celda de carga se deflecte adecuadamente para un funcionamiento correcto. Este soporte se fabricará en acero inoxidable AISI 304 para asegurar su durabilidad y resistencia en el entorno industrial. La segunda parte del montaje incluye una base sobre la cual se colocan los galones durante el proceso de llenado. Esta base, tiene la función de una plataforma de pesaje. En las figuras 4.4 y 4.5 se muestran las piezas diseñadas en el software SolidWorks, y en la figura 4.6 se muestra el acomodo de estas piezas respecto a la celda de carga.



**Figura 4.4:** Diseño de la plataforma superior de pesaje para la celda de carga.



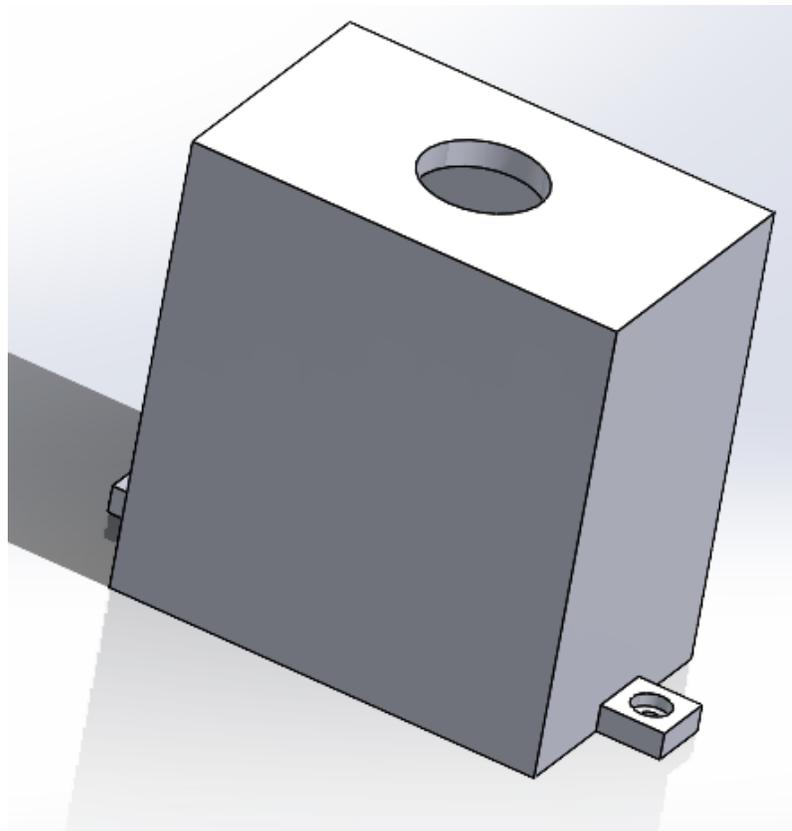
**Figura 4.5:** Diseño de la base de soporte inferior para la celda de carga.



**Figura 4.6:** Acomodo de piezas diseñadas para la celda de carga.

### 4.3.3 Montaje de botón de encendido y apagado

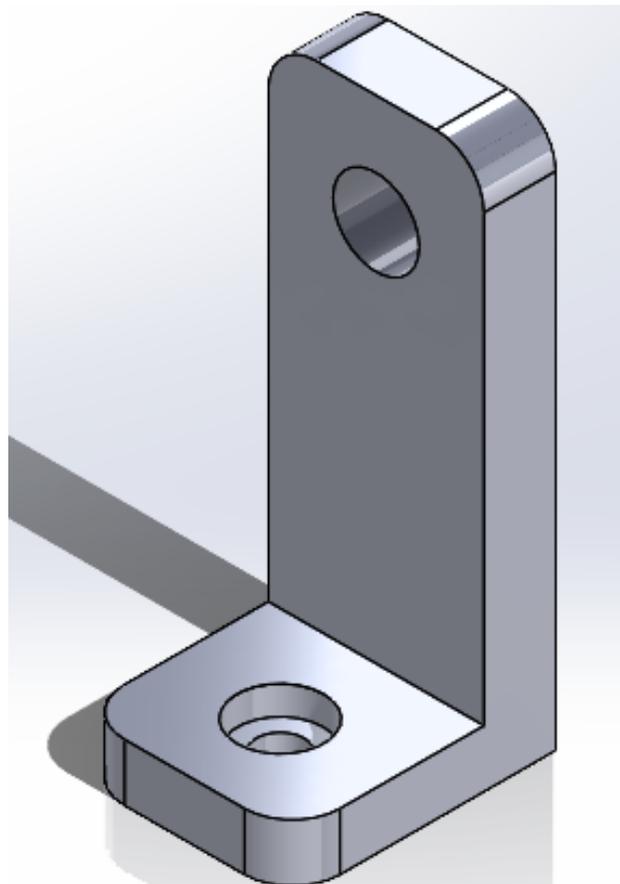
Se diseñó una carcasa para el botón de encendido y apagado, la cual se debe fijar a la mesa mediante tornillos. Basado en las dimensiones del botón seleccionado, se creó una estructura adecuada, fabricada en plástico ABS, un material resistente y adecuado para proteger el botón en el entorno industrial. Esta carcasa cuenta con un solo orificio, ya que el botón seleccionado, aunque tiene dos funciones (encendido y apagado), viene en una única estructura, lo que permite un montaje sencillo con un diámetro específico. En la figura 4.7 se muestra la pieza diseñada en el software SolidWorks.



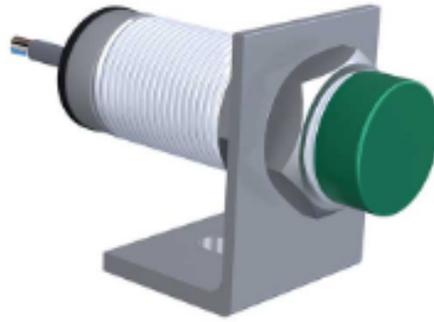
**Figura 4.7:** Diseño de carcasa para botón OFF/ON.

### 4.3.4 Montaje del sensor de proximidad

El sensor de proximidad debe ser instalado mediante un soporte diseñado específicamente para este fin. Este soporte, fabricado en acero inoxidable AISI 304 para garantizar su resistencia, permite ajustar el sensor a la altura adecuada para que siempre pueda detectar la presencia de un galón en la zona de llenado. El sensor se coloca en el hueco de la pieza diseñada, este se sujeta con las tuercas que vienen ya incluidas con el propio componente, y el soporte se fija a la mesa mediante tornillos, asegurando una instalación firme y ajustable según sea necesario. En la figura 4.8 se muestra la pieza diseñada en el software SolidWorks, y en la figura 4.9 un concepto de cómo es que se realiza este montaje.



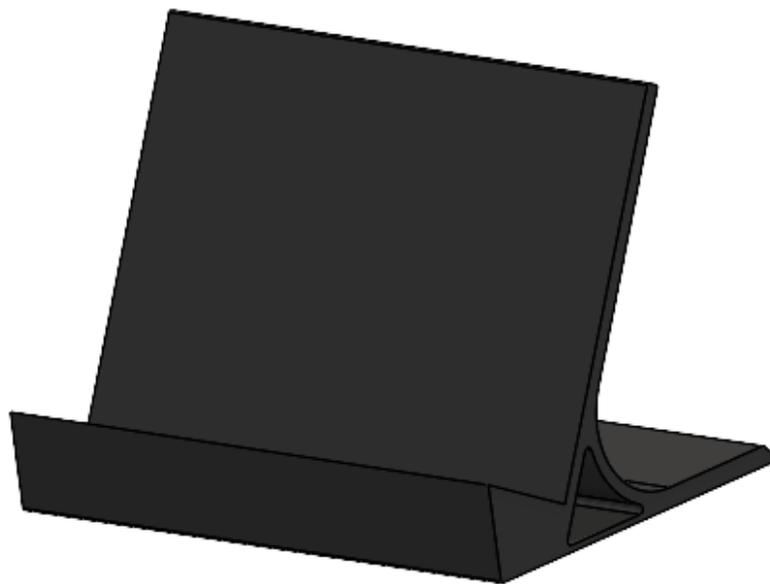
**Figura 4.8:** Diseño de soporte para montaje del sensor de proximidad.



**Figura 4.9:** Concepto de montaje del sensor de proximidad. [30]

### 4.3.5 Colocación del HMI

Para la colocación del HMI, se diseñó una base similar a la de un soporte para tabletas. Esta base está fabricada en plástico ABS, lo que garantiza ligereza y robustez al mismo tiempo. Se han establecido las medidas necesarias para acomodar el HMI seleccionado, que es una pantalla de 7 pulgadas. El soporte permite una buena visualización y acceso a la interfaz, asegurando una posición cómoda para los operadores. En la figura 4.10 se muestra la pieza diseñada en el software SolidWorks.

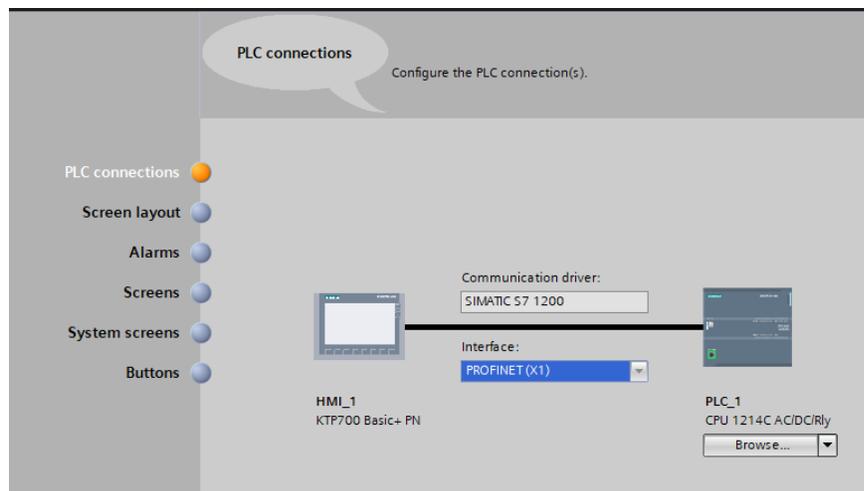


**Figura 4.10:** Diseño de montaje para HMI.

Todos los planos detallados de los componentes diseñados se encuentran disponibles en el Apéndice C.

## 4.4 Diseño de interfaz para el usuario

La interfaz gráfica del HMI es una parte sumamente importante del sistema de automatización, ya que permite a los operadores interactuar de manera intuitiva con el sistema y monitorear en tiempo real el proceso de llenado de galones de dulce de leche. En este proyecto como se mencionó anteriormente se seleccionó la pantalla HMI modelo KTP700 Basic de Siemens, que se conecta y comunica con el PLC SIMATIC S7-1200 mediante PROFINET, garantizando una integración eficiente y confiable. En la figura 4.11 se muestra como en el programa del Tia Portal se conecta el PLC con la pantalla HMI a través de PROFINET.



**Figura 4.11:** Conexión entre PLC y HMI en software TIA Portal.

Para el diseño de la interfaz, se utilizó la simulación en el entorno TIA Portal de Siemens, ya que no se cuenta con la pantalla HMI física durante el desarrollo del proyecto. En este caso, se realizó el diseño de la interfaz como se haría si se implementara el proyecto físicamente. Se configuraron todos los elementos necesarios, teniendo en cuenta los requerimientos operativos y asegurando que la configuración cumpla con lo que se necesitaría en una implementación real.

La interfaz desarrollada está diseñada con un enfoque en la simplicidad y funcionalidad, permitiendo al usuario seleccionar el peso objetivo de los galones de manera rápida e intuitiva.

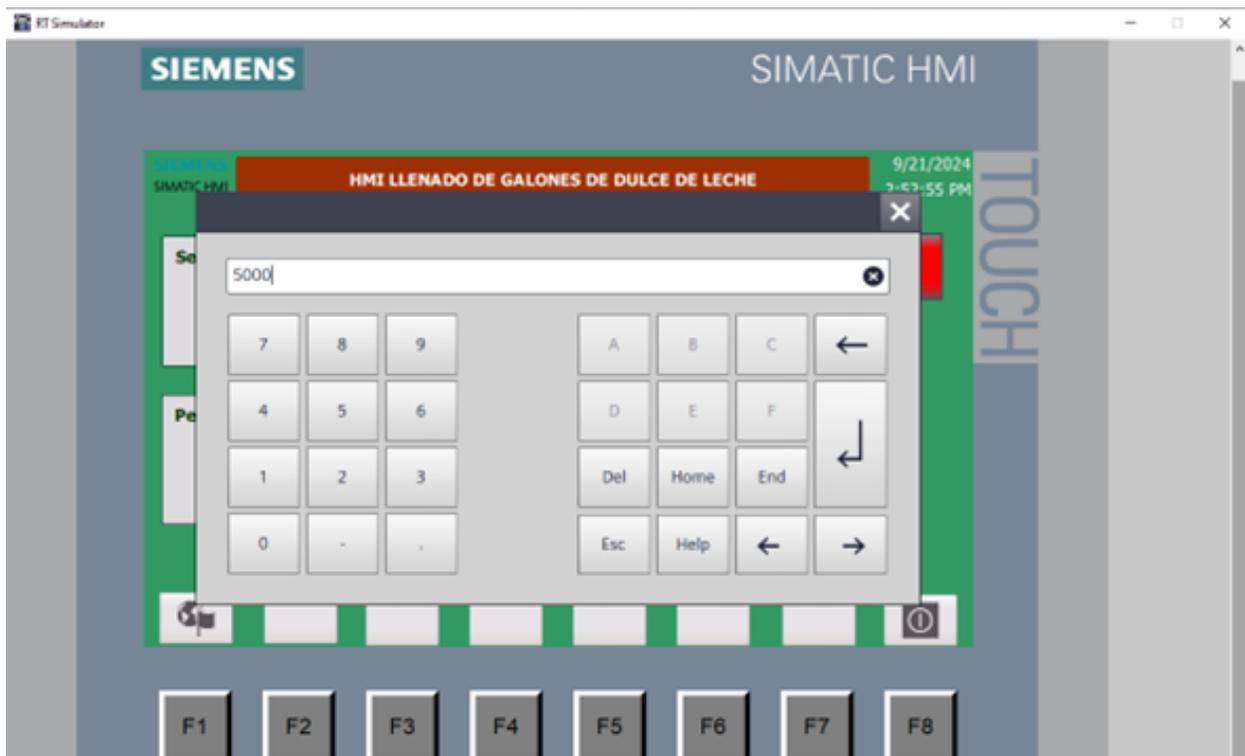
Además, se muestra el valor en tiempo real de la celda de carga, lo que permite al operador visualizar el peso acumulado durante el llenado, brindando una referencia clara y directa del progreso. En la figura 4.12 se muestra la interfaz diseñada y simulada en Tia Portal.



**Figura 4.12:** Interfaz para la HMI diseñada en el software TIA Portal.

Como se puede observar en la figura 4.12, la interfaz está dividida en varias secciones. En la parte superior, se incluye un texto gráfico con el título de la interfaz, acompañado de la fecha y la hora a la que se está haciendo uso del HMI. Luego, se encuentran las dos secciones principales: una para la entrada del peso deseado y otra para el monitoreo en tiempo real del peso del producto. Este diseño sencillo fue pensado para que cualquier usuario pueda interactuar fácilmente con la interfaz, evitando así la posibilidad de errores por opciones complejas y que no aportan valor.

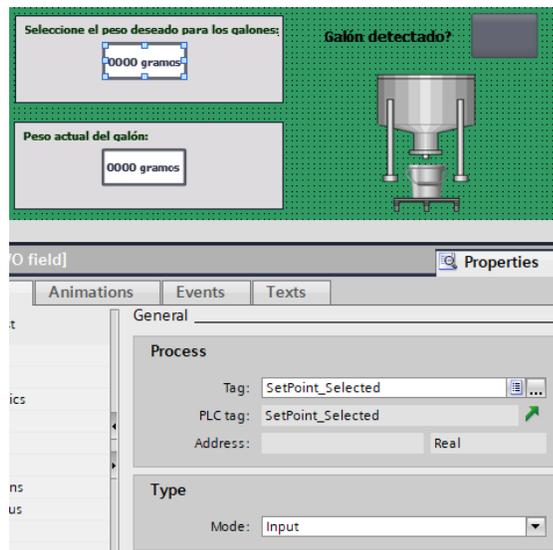
Dado que la pantalla HMI es táctil, el usuario puede ingresar el peso deseado para los galones simplemente tocando el área debajo del texto “Seleccione el peso deseado para los galones”. Al hacerlo, se abrirá un cuadro donde el usuario podrá introducir el peso deseado, que luego será procesado por el PLC. En la figura 4.13 se muestra la interfaz que el usuario vería al ingresar el peso.



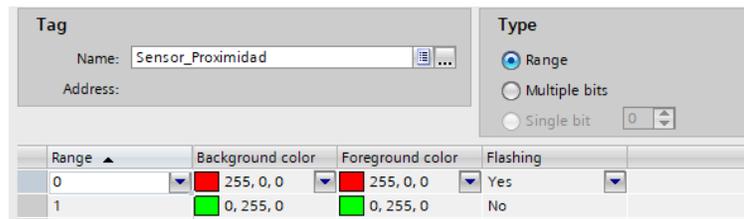
**Figura 4.13:** Interfaz de entrada de peso para el usuario en la HMI diseñada en TIA Portal.

Otro elemento importante es un botón indicador que señala la presencia del galón en la posición de llenado. Este botón cambia de color según la señal del sensor de proximidad: se ilumina en verde cuando se detecta un galón y en rojo cuando no hay un galón presente, permitiendo al operador confirmar visualmente si el sistema está listo para el llenado. Debajo de este botón se incluyeron íconos de una marmita y un galón, que, aunque no tienen una función operativa, mejoran la calidad visual de la interfaz. Finalmente, en la parte inferior izquierda y derecha, se encuentran dos botones: el de la izquierda permite cambiar el idioma, mientras que el de la derecha apaga la HMI. Cabe destacar que no se incluyeron botones de inicio y apagado en la interfaz del HMI, ya que estos son controles físicos externos.

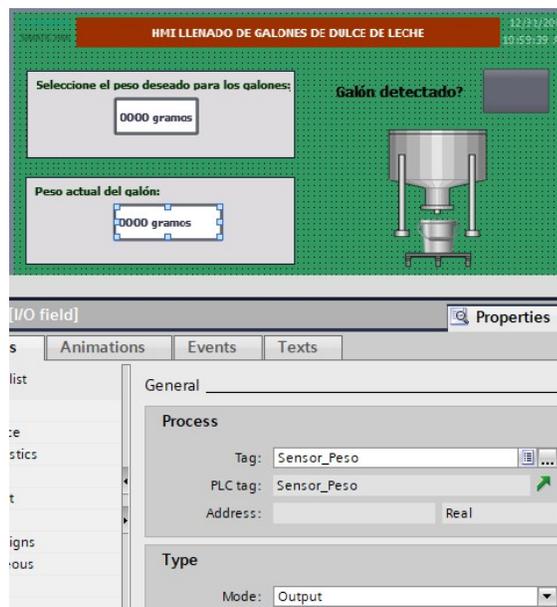
Para vincular las variables mostradas en la HMI con las variables del proceso en el PLC, se aprovechó la alta compatibilidad entre ambos dispositivos, ya que tanto la HMI como el PLC son de Siemens. Esto permitió que, en la interfaz, cada botón o gráfico pudiera asociarse fácilmente a una variable del proceso correspondiente, ya sea de entrada o salida. En las figuras 4.14, 4.15 y 4.16 se ilustra cómo cada uno de los botones se enlaza con una variable del proceso, lo que garantiza el correcto funcionamiento de la HMI dentro del sistema de control automatizado.



**Figura 4.14:** Vinculación de la variable de peso objetivo entre el PLC y la interfaz HMI.



**Figura 4.15:** Vinculación de la variable de detección de galón entre el PLC y la interfaz HMI.



**Figura 4.16:** Vinculación de la variable de medición del peso entre el PLC y la interfaz HMI.

## 4.5 Diseño del control automático del sistema

En esta sección, se explica el diseño del control automático del sistema, que consta principalmente de la determinación de las constantes del controlador PID para obtener un resultado preciso en el proceso de llenado de galones de dulce de leche. Para lograrlo, el primer paso fue obtener la función de transferencia del sistema de llenado de galones de dulce de leche, que en este caso era la planta.

El proceso para obtener la función de transferencia involucró realizar un montaje especial de medición en la fábrica donde se produce el dulce de leche. Para esto, se colocó una pesa digital debajo de los galones que se llenaban y se utilizó un cronómetro para medir los cambios de peso en función del tiempo. Además, se grabó el proceso para tener un registro visual del comportamiento del sistema. El encargado del llenado abrió y cerró la llave que regula el flujo del dulce de leche, simulando una entrada de tipo escalón unitario.

Este escalón unitario implica que la entrada pasa de un valor de 0, cuando la llave está cerrada, a un valor de 1, cuando la llave se abre. De esta manera, se observa cómo varía la salida del sistema, que en este caso es el peso del dulce de leche en el galón, en respuesta a la entrada. Cada 0.1 segundos se registró el peso para tener una representación precisa del cambio de salida a lo largo del tiempo. Para analizar cómo variaba este peso, se utilizó un editor de video para observar cada fotograma del video tomado en la fábrica, registrando los cambios de peso del sistema cada 0.1 segundos. Este montaje se muestra en la figura 4.17.

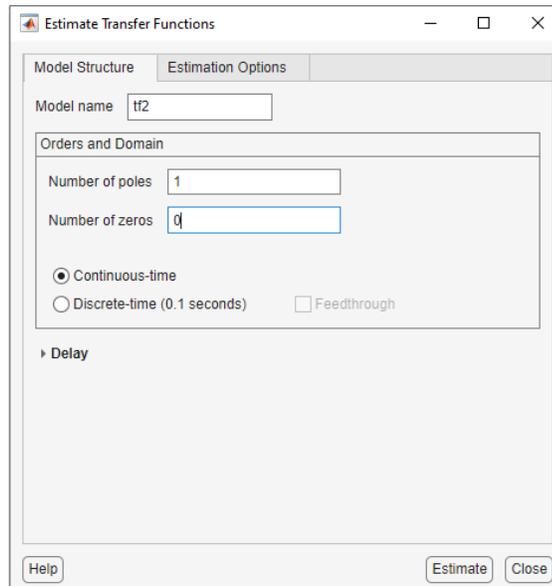
Se realizaron dos tomas de datos principales: una al inicio del proceso y otra en la parte final del mismo. Esto se hizo con el fin de obtener dos funciones de transferencia que consideraran todas las variables del proceso, y para verificar posteriormente si el control automático planteado se adaptaba de manera efectiva a ambas funciones de transferencia. Estos datos permiten además observar si el sistema se comporta como un sistema lineal e invariante en el tiempo (LTI), lo cual es crucial para la correcta aplicación de las técnicas de control PID. Estos dos conjuntos de datos se presentan en el apéndice A.



**Figura 4.17:** Montaje especial de medición para obtener la función de transferencia.

Para la obtención de las funciones de transferencia del sistema, se empleó el software Matlab. Utilizando los datos recolectados anteriormente, se hizo uso de la herramienta System Identification disponible en Matlab, que es ideal para sistemas SISO (Single Input Single Output). El primer paso consistió en importar los datos de entrada, que en este caso correspondían al valor del escalón unitario: un valor de 0 en el tiempo 0 y de 1 en el tiempo 0.1 en adelante. Luego, se importaron los datos de salida, correspondientes a las variaciones del peso que se registraron a intervalos de 0.1 segundos, reflejando el cambio en la respuesta del sistema.

Una vez importados los datos, se procedió a la herramienta System Identification, donde se establecieron los valores de entrada y salida, el tiempo de muestreo (0.1 segundos) y el tiempo de inicio (0 segundos). Con esta información, se indicó a la herramienta que el objetivo era estimar una función de transferencia que modelara el comportamiento del sistema. En esta etapa, la herramienta solicita definir el número de ceros y polos que debe tener la aproximación. Se realizaron pruebas con diferentes combinaciones de polos y ceros para determinar la que ofreciera la mejor representación del sistema. En la figura 4.18 se muestra la interfaz de Matlab donde se solicitan estos polos y ceros para la estimación de la función de transferencia



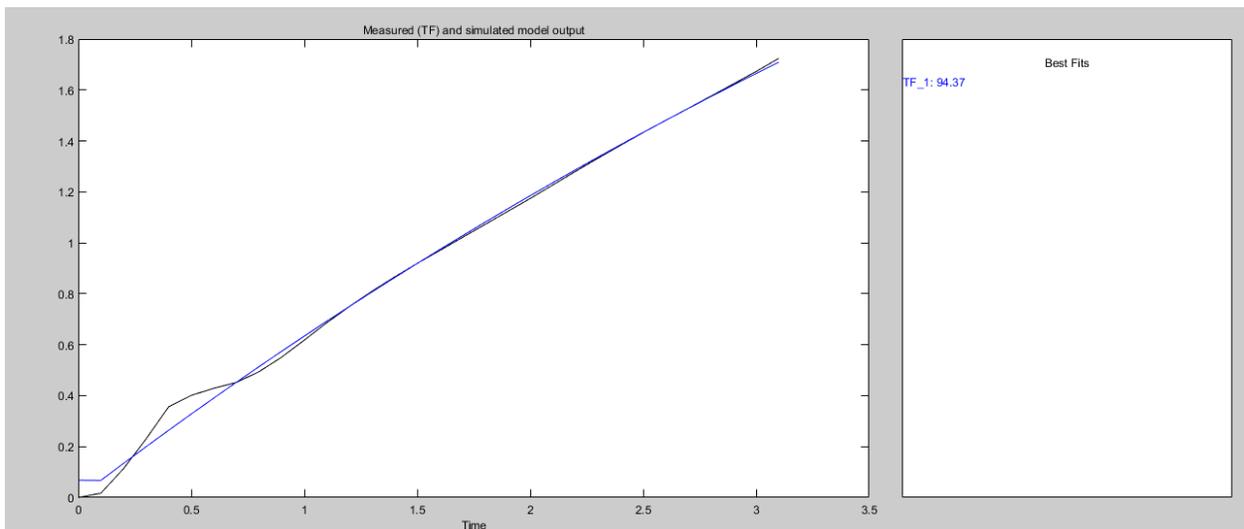
**Figura 4.18:** Interfaz de Matlab para estimar función de transferencia.

Finalmente, se encontró que la mejor aproximación se obtuvo con una función de transferencia con un polo y ningún cero. Esta configuración proporcionó un porcentaje de ajuste del 94.67% para el primer conjunto de datos y del 93.65% para el segundo conjunto. Estos altos porcentajes de ajuste sugieren que las funciones de transferencia determinadas son representativas del comportamiento real de la planta, permitiendo así avanzar con el diseño del control PID basado en estas funciones. En la figura 4.19 se presenta la comparación entre la salida del modelo de la planta y la salida de la función de transferencia estimada. Se puede observar que la función de transferencia proporciona una aproximación muy similar al comportamiento del sistema real, validando su capacidad para representar adecuadamente la dinámica del proceso.

Las dos funciones de transferencia obtenidas con el software Matlab se presentan en las ecuaciones 4.1 y 4.2.

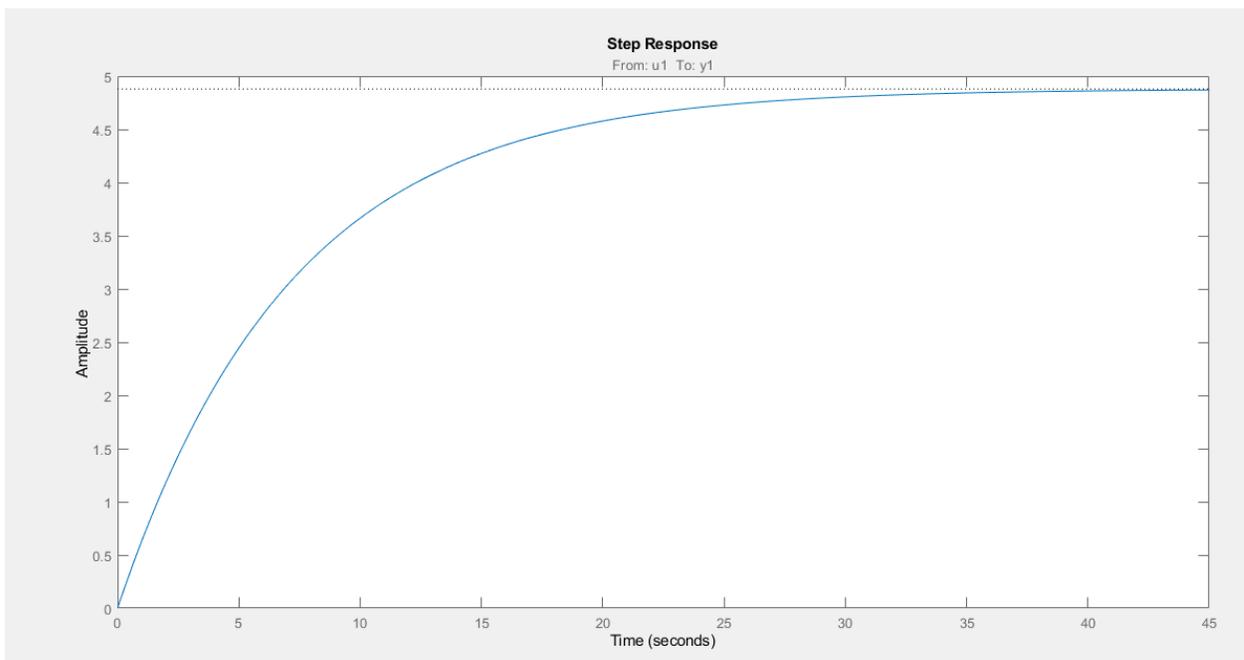
$$Tf1 = \frac{0.6788}{s + 0.1391} \quad (4.1)$$

$$Tf2 = \frac{0.677}{s + 0.1372} \quad (4.2)$$

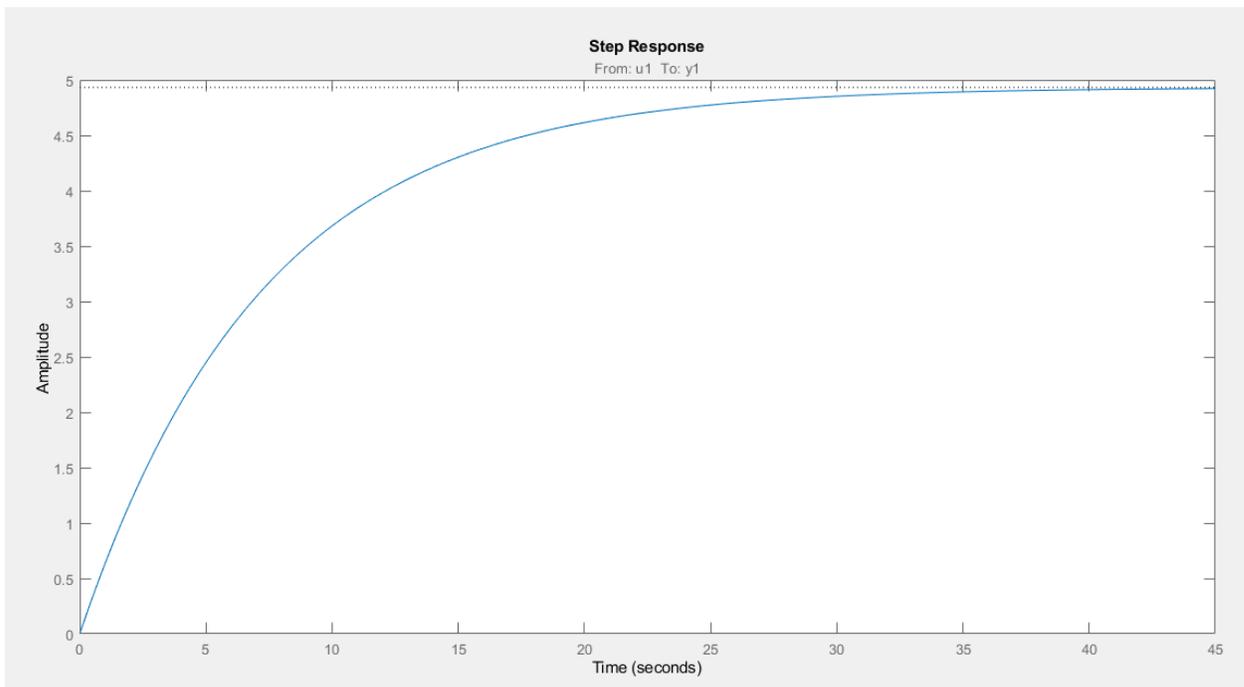


**Figura 4.19:** Comparación entre la salida del modelo de la planta y la función de transferencia estimada #1.

En las figuras 4.20 y 4.21 se muestra la respuesta de estas plantas ante un escalón, y como sin un control automático no cumplen con los tiempos deseados de llenado. Estas dos figuras son casi idénticas, ya que como se observa en las ecuaciones 4.1 y 4.2, ambas funciones de transferencia son muy similares, pues el comportamiento obtenido de la toma de datos se mantuvo al inicio y al final del proceso.



**Figura 4.20:** Respuesta ante el escalón de la función de transferencia estimada #1 sin control.



**Figura 4.21:** Respuesta ante el escalón de la función de transferencia estimada #2 sin control.

Una vez obtenidas las funciones de transferencia, se procedió a realizar el diseño del controlador PID utilizando la herramienta *PID Tuner* de Matlab. En primer lugar, se importó la función de transferencia obtenida previamente, la cual representa el comportamiento dinámico del sistema. Esta herramienta permite ajustar de manera gráfica los parámetros del controlador, observando en tiempo real cómo cambia la respuesta del sistema a medida que se modifican las variables de tiempo de respuesta (más rápido o más lento) y el comportamiento transitorio (más agresivo o más robusto). En la figura 4.22 se muestra como se ven estos parámetros modificables en PID Tuner.



**Figura 4.22:** Parámetros modificables en PID Tuner.

A medida que se ajustaban estos parámetros, se buscaba obtener una respuesta que cumpliera con los requisitos del sistema, optimizando tanto el tiempo de llenado como la estabilidad del control. Una vez alcanzada la respuesta deseada, la herramienta permitió exportar el controlador calculado, que incluye las constantes del controlador PID.

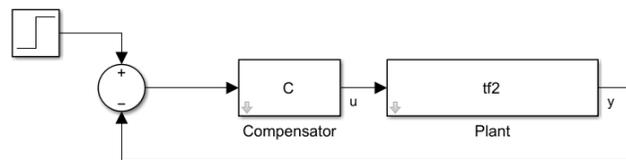
En este proyecto, se determinó que un controlador PI era el más adecuado, debido a que la planta, con solo un polo y ningún cero, no es muy compleja. Por lo tanto, solo fue necesario

utilizar las constantes  $K_p$  y  $K_i$ . El controlador final se presenta en la ecuación 4.3.

$$C = 0.634 + \frac{0.0882}{s} \quad (4.3)$$

En la sección de validación, se presentarán las gráficas que demuestran cómo estas constantes cumplen con los requisitos establecidos tanto para el tiempo de llenado como para el tiempo de control, validando la efectividad del controlador PI diseñado para este sistema.

Con estas constantes obtenidas, se tiene finalmente un controlador automático. Al implementar este controlador PI en serie con la planta y cerrar el lazo de control con realimentación desde la salida, que en este caso es el peso medido por la celda de carga, el sistema presenta el comportamiento deseado. Este controlador permite que el sistema regule de forma automática el flujo de dulce de leche para alcanzar el peso objetivo de manera precisa y eficiente, cumpliendo con los requisitos de control establecidos para el proceso de llenado. En la figura 4.23 se muestra este diagrama del control automático, donde el bloque C se refiere al control PI y el bloque Plant se refiere a la función de transferencia obtenida.



**Figura 4.23:** Diagrama del control automático planteado.

## 4.6 Diseño de la lógica de programación del PLC

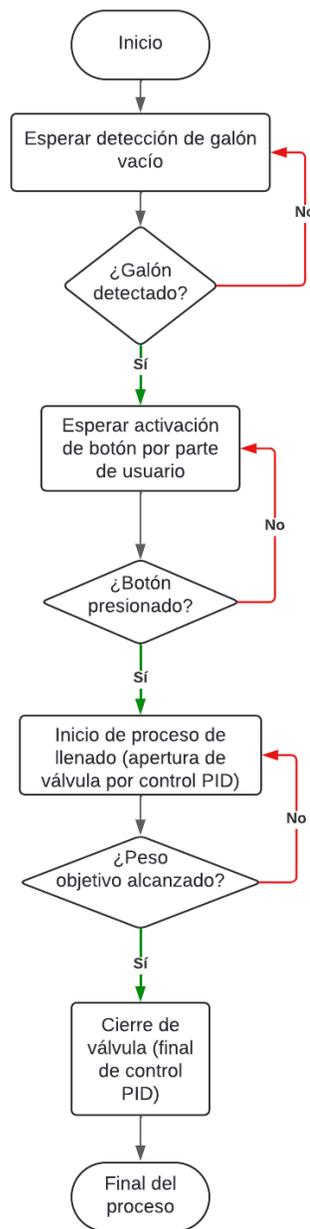
En esta sección, se presenta el diseño de la lógica de programación del PLC, ya que, tras aplicar la metodología planteada por Ulrich y Eppinger [21] se determinó que el PLC era el dispositivo más adecuado para el control automatizado del proceso de llenado de galones de dulce de leche. El desarrollo de la lógica de programación del PLC resulta importante ya que sin una programación adecuada, el sistema no puede ejecutar las acciones necesarias para automatizar el proceso de llenado. La programación permite que el PLC interprete las señales de los sensores, controle los actuadores, y realice decisiones en tiempo real basadas en las condiciones del sistema.

A pesar de que en este proyecto no se implementará físicamente el PLC debido a limitaciones de tiempo y recursos, el diseño de la programación se realizó en el software TIA Portal, que es el entorno de programación utilizado para los PLCs de Siemens, como el seleccionado para este proyecto (Siemens S7-1200 CPU 1214C AC/DC/Relay). La lógica de control fue diseñada en diagrama de escalera (Ladder Diagram), un lenguaje gráfico sumamente utilizado en la industria para la programación de PLCs debido a su simplicidad y similitud con los circuitos eléctricos convencionales. El diagrama de escalera permite visualizar fácilmente el flujo de señales lógicas, donde los contactos representan las entradas y los bobinados representan las salidas.

La programación fue estructurada en función de los siguientes pasos clave:

- **Inicio del Proceso:** El proceso requiere que se cumplan dos condiciones iniciales. Primero, el operador debe presionar el botón de inicio, que activa el sistema. Sin embargo, aunque se oprima este botón, el proceso no comenzará si no se detecta un galón vacío en la posición de llenado.
- **Detección de Galón Vacío:** Una vez que el botón de inicio ha sido activado, el sistema verifica la segunda condición: la presencia de un galón vacío. Esto se realiza mediante un sensor de proximidad. Solo cuando ambas condiciones se cumplen (botón de inicio activado y galón detectado), el proceso de llenado puede comenzar.
- **Activación de la Válvula Solenoide:** Una vez que ambas condiciones iniciales se han cumplido, se activa la válvula solenoide, permitiendo el flujo de dulce de leche controlado hacia el galón.
- **Control del Llenado mediante Medición de Peso:** Durante el llenado, la celda de carga mide el peso del galón en tiempo real. El PLC ajusta el proceso de llenado hasta alcanzar el peso objetivo mediante un control PID.
- **Cierre de la Válvula:** Al alcanzar el peso programado, el PLC cierra la válvula solenoide para detener el flujo.
- **Botón de Paro de Emergencia:** En caso de emergencia, el operador puede detener el proceso en cualquier momento presionando el botón de paro, que desactiva todo el sistema de forma inmediata.

A continuación, en la figura 4.24 se presenta un diagrama de flujo que ilustra de manera más gráfica la lógica de programación desarrollada para el control del llenado de galones de dulce de leche.



**Figura 4.24:** Diagrama de flujo de programación del PLC.

Ahora, en las figuras 4.25, 4.26 y 4.27 se presenta el diagrama de escalera que ilustra la lógica de programación del PLC. Este diagrama está dividido en tres redes principales, cada una de las cuales aborda diferentes aspectos del control del proceso de llenado de galones de dulce de leche. La primera red se centra en las condiciones iniciales y la activación del

sistema, la segunda se centra en el paro de emergencia, y la tercera se ocupa del control del llenado y la gestión de la válvula solenoide.

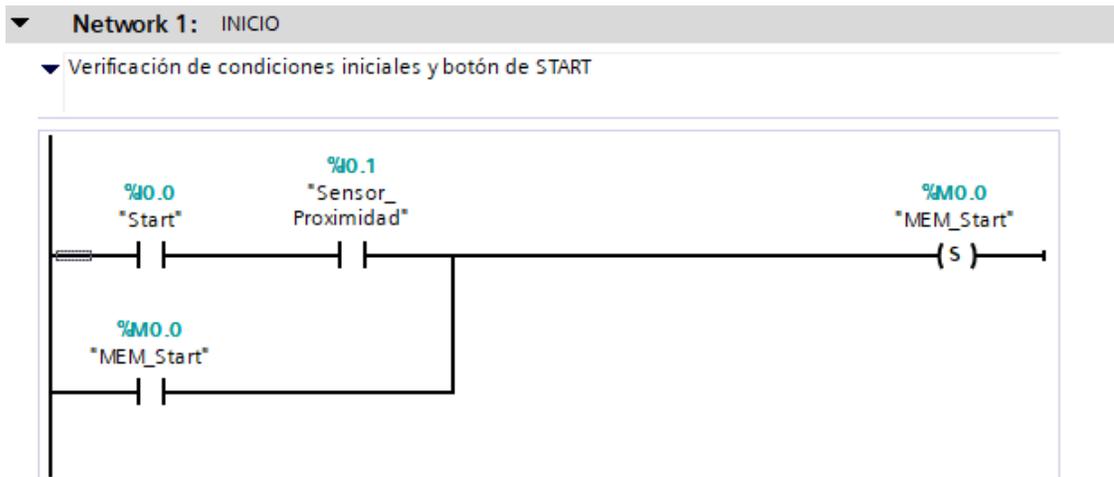


Figura 4.25: Programación de condiciones iniciales en TIA Portal.

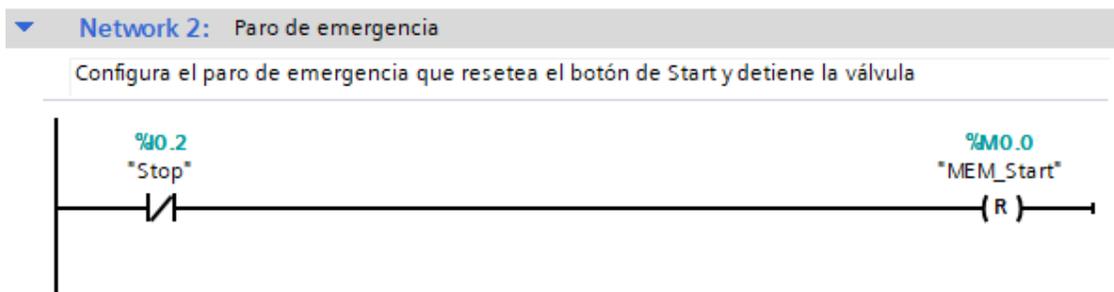


Figura 4.26: Programación de parada de emergencia en TIA Portal.

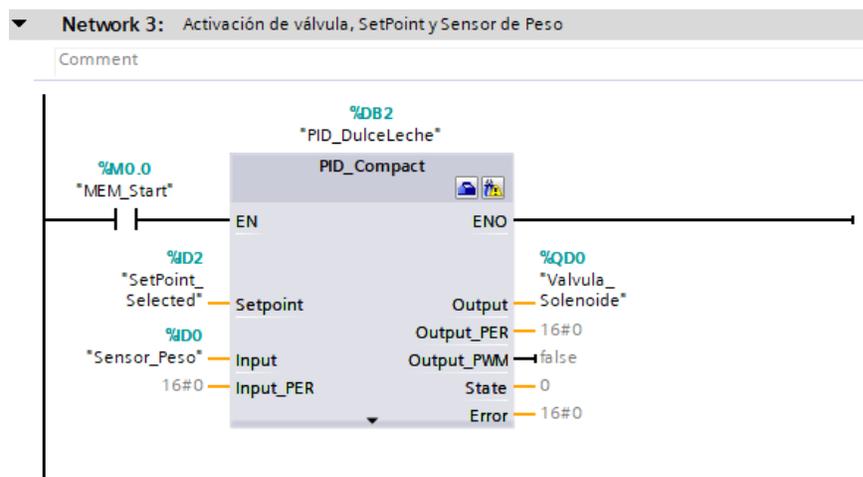


Figura 4.27: Programación de regulación de válvula en TIA Portal.

La primera red de la programación del PLC tiene como objetivo establecer las condiciones

iniciales para el inicio del proceso. Este proceso requiere que se cumplan dos condiciones: primero, el operador debe presionar el botón de inicio, lo que activa el sistema. Sin embargo, aunque se oprima este botón, el proceso no comenzará si no se detecta un galón vacío en la posición de llenado. Una vez que el botón de inicio ha sido activado, el sistema verifica la segunda condición: la presencia de un galón vacío, lo cual se realiza mediante un sensor de proximidad. Solo cuando ambas condiciones se cumplen (el botón de inicio está activado y el galón es detectado), se permite el inicio del proceso de llenado.

La segunda red se encarga del control del paro de emergencia. En cualquier momento, el operador puede presionar el botón de paro de emergencia para detener inmediatamente el proceso. Esta red asegura que todas las operaciones se interrumpan de forma segura y que se desactive el sistema, evitando cualquier riesgo para el operador o el equipo.

La tercera red se ocupa del control del llenado. Una vez que se han cumplido las condiciones iniciales y el sistema está listo para llenar, se activa la válvula solenoide, permitiendo el flujo controlado de dulce de leche hacia el galón. Durante el llenado, una celda de carga mide el peso del dulce de leche en tiempo real, lo que permite al PLC mediante el bloque de PID ajustar el proceso de llenado hasta que se alcanza el peso objetivo. Al alcanzar este peso programado, el PLC cierra la válvula solenoide para detener el flujo.

En este sistema, las entradas (inputs) se almacenan en las entradas digitales del PLC, las cuales tienen direcciones específicas. Estas direcciones incluyen la dirección de bits que identifica cada entrada. Las entradas son las siguientes: el botón de inicio, que permite al operador activar el sistema; el sensor de proximidad, que detecta la presencia de un galón vacío; el botón de paro de emergencia, que permite detener el proceso en cualquier momento; la entrada del setpoint mediante la HMI que indica el valor de peso al que se desea llegar; y la celda de carga, que proporciona mediciones continuas del peso del dulce de leche durante el llenado. Luego, para el caso de las salidas, se tiene una única salida siendo esta la válvula solenoide encargada del flujo del dulce de leche hacia el galón.

Como en este caso no se tiene el PLC físico, se han asignado direcciones iniciales como I0.0 para representar las entradas en el software de programación. Sin embargo, para el caso de una implementación física real, debe de buscarse la dirección y el bit que estén disponibles en el PLC para asegurar una correcta funcionalidad del sistema.

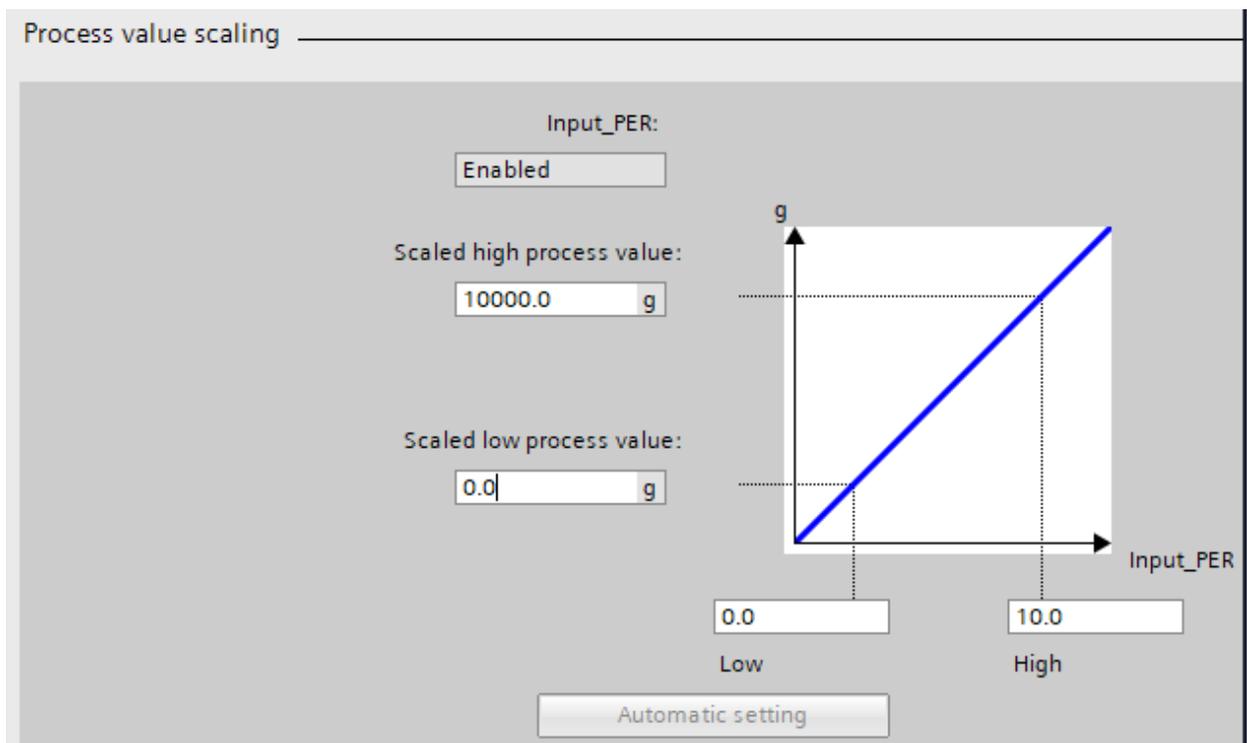
La configuración del bloque PID es esencial para el control automatizado del proceso de llenado de galones de dulce de leche, ya que integra las señales de entrada, el valor objetivo y el actuador. En este bloque, se tienen como entradas principales la señal de la celda de carga y el valor objetivo, que es introducido por el usuario a través de la HMI. Estos datos permiten que el sistema compare el peso real con el valor deseado, ajustando el proceso según sea necesario.

Dentro del bloque del PID, se configuran ciertos parámetros clave para asegurar un funcionamiento adecuado. Las dos configuraciones principales son el ajuste de las constantes para el PID y la calibración del sistema.

En primer lugar, se establecen las constantes del PID, que son los valores de ganancia proporcional ( $K_p$ ) y ganancia integral ( $K_i$ ). En caso de ser necesario, también se puede incluir la ganancia derivativa ( $K_d$ ). Las constantes PID calculadas para este proyecto se encuentran detalladas en la sección de “Diseño del Control Automático del Sistema”, y en este caso particular, solo se requirieron las constantes  $K_p$  y  $K_i$  para un control efectivo.

Por otro lado, es fundamental la calibración del bloque PID, tanto para la entrada como para la salida, según los valores de los sensores y actuadores utilizados en el sistema. Para el caso de este proyecto, se utilizó una celda de carga con un rango de medición de 0 a 10 kg, por lo que se configuraron los límites de entrada entre 0 y 10,000, utilizando gramos como unidad de medida. Para la salida, que controla la válvula proporcional seleccionada, se establecieron los límites de 0 a 10, ya que la señal de control de la válvula tiene un rango de 0 a 10V.

Esta calibración permite que el PLC interprete correctamente los valores de la celda de carga y envíe la señal adecuada a la válvula solenoide, asegurando un control preciso del proceso de llenado. En la figura 4.28 se muestra cómo se realizó esta calibración dentro del bloque del PID, permitiendo un ajuste óptimo del sistema.



**Figura 4.28:** Calibración del bloque PID en TIA Portal.

Con estos ajustes, el PLC está correctamente configurado para controlar el proceso de llenado de manera eficiente y precisa.

# Capítulo 5

## Análisis Económico

Esta sección de análisis económico busca evaluar la viabilidad financiera del proyecto de automatización del llenado de galones de dulce de leche, considerando los costos iniciales, los ahorros proyectados debido a la reducción del desperdicio del producto y el tiempo necesario para recuperar la inversión. Además, se pretende estimar los beneficios económicos a largo plazo, justificando la implementación de la solución propuesta en términos de rentabilidad y eficiencia operativa. A través de este análisis, se busca demostrar cómo la automatización no solo optimiza el proceso de producción, sino que también genera un impacto positivo en el aspecto económico a la empresa.

### 5.1 Costos del proyecto

El proyecto requiere de una inversión inicial que cubre tanto los materiales como los componentes utilizados, además de la mano de obra involucrada en el diseño, y la implementación del sistema. A continuación en la tabla 5.1 se presenta un desglose aproximado de los costos.

**Tabla 5.1:** Listado de costos para el proyecto.

<i>Lista de componentes</i>			
<b>Componente</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Total</b>
Celda de carga	1	\$12	\$12
Válvula proporcional	1	\$331	\$331
PLC Siemens S7-1200 PU 1214C AC/DC/Relay	1	\$400	\$400
Módulo Salida Analógica para PLC SB 1232	1	\$180	\$180
Sensor de proximidad	1	\$20	\$20
SIMATIC HMI KTP700 Basic 7"	1	\$600	\$600
Botón ON/OFF	1	\$10	\$10
Piezas diseñadas (soportes, acoples, carcasas)	1	\$200	\$200
Mano de obra de diseño (horas del estudiante)	320	\$4.40	\$1,408
Mano de obra de instalación/implementación	1	\$1,000	\$1,000
Imprevistos	1	\$150	\$150
<b>Total</b>			<b>\$4,311</b>

Cabe destacar que, para calcular el costo de la mano de obra de diseño (las horas de trabajo del estudiante), se tomó como referencia el salario mínimo correspondiente a una persona no graduada. Este valor se utilizó para estimar un total de 20 horas semanales durante las 16 semanas que abarcó el proyecto, resultando un total de 320 horas. En cuanto a la mano de obra necesaria para la instalación, únicamente se consideró el tiempo dedicado a la instalación propiamente dicha, excluyendo el diseño, ya que este se realizó como parte del desarrollo del proyecto. Finalmente, para el caso de las piezas diseñadas, el costo listado se refiere a la estimación tanto de los materiales, como la mano de obra requerida para su fabricación.

Como se puede observar, el costo total del proyecto es de aproximadamente a \$4,311. Este monto refleja la inversión inicial necesaria para la implementación completa del sistema de automatización en la planta.

## 5.2 Ahorros Projectados

La principal fuente de ahorro que se generará a través de la automatización es la reducción del sobrellenado en cada galón de dulce de leche. Actualmente, cada galón de 5 kg tiene un sobrellenado promedio de 100 gramos, lo que representa un desperdicio económico significativo.

Cada galón de 5 kg tiene un costo de 8500 colones (16.4 dólares), lo que implica que cada 100 gramos de dulce de leche tienen un valor de 170 colones (0.33 dólares). En la planta, se producen 5 tandas diarias de 75 galones cada una, lo que da un total de 375 galones diarios. Con estos datos, se puede calcular el desperdicio diario de la siguiente manera:

$$375 \text{ galones} \times 0.33 \text{ dólares} = 123.75 \text{ dólares diarios en desperdicio}$$

Con la implementación del sistema automatizado, se espera eliminar este desperdicio, logrando un ahorro de aproximadamente 123.75 dólares al día.

## 5.3 Retorno de la Inversión

El siguiente paso en el análisis es calcular el tiempo de recuperación de la inversión. Dado que el ahorro diario es de 123.75 dólares, se puede determinar cuántos días se requieren para recuperar la inversión inicial de 4311 dólares:

$$\text{Tiempo de recuperación} = \frac{4311 \text{ dólares}}{123.75 \text{ dólares/día}} \approx 35 \text{ días}$$

Esto indica que la inversión se recuperará en aproximadamente 35 días de operación normal de la planta. Después de este período, la empresa comenzará a obtener ahorros netos derivados de la reducción del desperdicio.

## 5.4 Beneficios a Largo Plazo

Aparte de la rápida recuperación de la inversión, el proyecto presenta beneficios económicos a largo plazo. Si se considera que la planta opera durante todo el año, el ahorro anual estimado sería:

$$123.75 \text{ dólares/día} \times 365 \text{ días/año} = 45,168.75 \text{ dólares/año}$$

De esta manera, el análisis económico evidencia una alta rentabilidad del proyecto, con un tiempo de recuperación de la inversión sumamente rápido de aproximadamente 35 días. A partir de ese momento, la empresa podrá generar ahorros anuales cercanos a los 45,000 dólares en comparación con el proceso actual, lo que refuerza la viabilidad y justificación de la inversión inicial.

## 5.5 Indicadores Económicos

Para evaluar la viabilidad económica del proyecto, se realizó el cálculo de los principales indicadores financieros, tomando una tasa de descuento del 15%. En la Tabla 5.2 se resumen los costos y beneficios del proyecto, así como el flujo de caja neto acumulado a lo largo de cinco años.

**Tabla 5.2:** Cálculo de costos y beneficios del proyecto

	2024	2025	2026	2027	2028	2029	Total
<b>Beneficio de Proyecto</b>	\$0	\$45,169	\$45,169	\$45,169	\$45,169	\$45,169	\$225,844
<b>Costo del Proyecto</b>	\$4,311	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$4,311
<b>Mantenimiento Anual</b>	\$0	\$400	\$400	\$400	\$400	\$400	\$2,000
<b>Flujo de Caja Neto</b>	-\$4,311	\$40,458	\$85,227	\$129,995	\$174,764	\$219,533	\$219,533
<b>Valor Actual Neto</b>	\$147,102						

A partir de estos datos, se obtuvieron los siguientes indicadores:

- **Valor Actual Neto (VAN):** \$147,102 USD
- **Tasa Interna de Retorno (TIR):** 1038%

- **Retorno sobre la Inversión (ROI): 3446%**

Estos porcentajes obtenidos son bastante altos debido a la baja inversión inicial del proyecto y a los beneficios recurrentes obtenidos anualmente, lo cual se traduce una alta rentabilidad y viabilidad económica.

# Capítulo 6

## Resultados y Análisis

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las pruebas de validación del proyecto de automatización del llenado de galones de dulce de leche. El objetivo principal es analizar si el sistema desarrollado cumple con los requerimientos y métricas previamente establecidos, asegurando que la solución propuesta sea viable y eficiente.

En primer lugar, se describe cómo se llevó a cabo la prueba de concepto, incluyendo detalles sobre su construcción y los componentes utilizados. Esta prueba de concepto valida las métricas planteadas en las primeras dos pruebas de validación.

Una vez explicada la prueba de concepto, se presenta el análisis de las cuatro pruebas de validación detalladas en la metodología, verificando si las métricas establecidas se cumplen. Para la métrica de precisión de llenado, se realizó un análisis estadístico de repetibilidad y reproducibilidad (R&R) utilizando los datos de la prueba de concepto. En cuanto a la última prueba, esta consta de una simulación en software para evaluar los tiempos de respuesta y control del sistema.

De este modo, se busca confirmar que el sistema diseñado cumple con las expectativas del proyecto y que las soluciones propuestas son eficaces para satisfacer las necesidades y requisitos identificados.

## 6.1 Prueba de concepto

### 6.1.1 Objetivo de de la prueba de concepto

La prueba de concepto tiene como objetivo abarcar las primeras dos pruebas de validación descritas en el capítulo 3 de la metodología.

#### **Prueba 1: Evaluación de precisión y configuración de peso**

En esta prueba, se evalúa la capacidad del sistema para dosificar con precisión la cantidad de dulce de leche en cada galón, así como el rango de ajuste del peso objetivo que el usuario puede seleccionar. Las métricas a validar son:

- Precisión del llenado (desviación estándar)
- Rango de ajuste del peso objetivo

Para esta prueba, se realiza el análisis de Repetibilidad y Reproducibilidad (R&R), que permite determinar la precisión del llenado en función de los datos obtenidos durante varios ciclos de llenado.

#### **Prueba 2: Interacciones del usuario y detección**

La segunda prueba de validación tiene como propósito evaluar las interacciones del usuario con el sistema y la detección de galones vacíos. Las métricas que se validan son:

- Tasa de detección de galones
- Tasa de éxito de los botones
- Tiempo de aprendizaje

Estas métricas aseguran que el sistema pueda detectar correctamente los galones listos para ser llenados y que la interfaz sea fácil de usar para los operadores.

### 6.1.2 Explicación y armado de la prueba de concepto

Para esta prueba de concepto se consiguieron los principales componentes para simular el proceso de llenado. Estos se presentan a continuación junto con su respectivo propósito:

- Arduino Uno: Actúa como el controlador central del sistema, gestionando las entradas

y salidas de los componentes, así como la lógica del proceso de llenado.

- Celda de carga: Permite medir el peso de los galones durante el llenado.
- Módulo HX711: Este módulo es un convertidor analógico-digital diseñado para facilitar la lectura de celdas de carga. Su función principal es amplificar y convertir la señal de la celda de carga a un formato digital que el Arduino puede procesar, lo que permite una medición precisa del peso [31].
- Válvula solenoide: Controla el flujo de dulce de leche durante el proceso de llenado, abriéndose y cerrándose de acuerdo con las señales del Arduino.
- Sensor capacitivo: Detecta la presencia de galones vacíos, activando el proceso de llenado cuando se coloca un galón en su posición.
- Botón de inicio: Permite al usuario iniciar el proceso de llenado.
- Botón de paro: Permite al usuario detener el proceso de llenado en cualquier momento.

Además de los componentes principales, se adquirieron componentes adicionales que, aunque no son parte del sistema principal, son necesarios para su desarrollo:

- Adaptador de 120 VAC a 12 VDC: Suministra la energía necesaria para la válvula solenoide y el sensor capacitivo.
- Resistencias: Utilizadas para referenciar los botones de ON/OFF a tierra y evitar cortos circuitos.
- Transistor: Funciona como un switch para el control de la válvula solenoide mediante las señales del microcontrolador .
- Diodo Zener: Se emplea para proteger que la corriente suministrada por la fuente externa no se devuelva a la placa del Arduino.
- Breadboard: Se utiliza para realizar las conexiones eléctricas necesarias para el funcionamiento de la prueba de concepto.

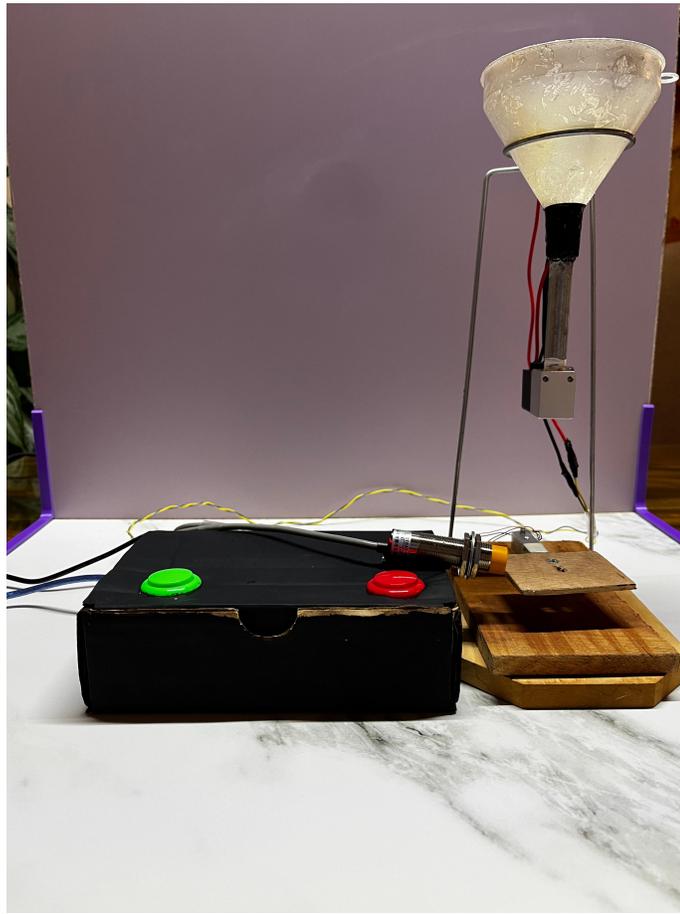
Una vez se consiguieron estos componentes, se procedió a realizar las conexiones eléctricas de todos los componentes mencionados, así como el montaje de cada uno de ellos en su respectiva posición. La mayor parte de los componentes fueron ubicados dentro de una caja de cartón, donde se colocó el Arduino junto con todas las conexiones necesarias. Para facilitar estas conexiones, se utilizaron dos breadboards pequeñas, las cuales permitieron enlazar los diferentes elementos al microcontrolador. Dentro de esta caja también se ubicó el módulo HX711, encargado de la conversión de las señales de la celda de carga.

En la superficie de la caja, se realizaron dos huecos que sirvieron para montar los botones de Start y Stop, de modo que el usuario pueda acceder fácilmente a ellos. Además, se hicieron aberturas adicionales para permitir la salida de los cables que se conectan a la válvula solenoide, el sensor capacitivo y la celda de carga, evitando desorden en el montaje y manteniendo un acceso ordenado a estos componentes externos.

Adicionalmente, se diseñó una estructura en madera como la que se muestra en la Figura 4.6, la cual permitió montar la celda de carga de manera adecuada.

Esta estructura tiene una forma similar a la de una pesa, donde un extremo de la celda de carga está sujeto al soporte inferior y el otro extremo sostiene una base sobre la que se coloca el envase a llenar. Para la fijación de la celda de carga, se utilizaron los orificios incluidos en la propia celda, los cuales están diseñados para tornillos M4 y M5, asegurando un montaje firme y preciso que permite obtener mediciones de peso confiables durante el proceso de llenado.

La programación del Arduino se realizó configurando los botones de Start y Stop, el valor de la celda de carga, y el sensor capacitivo como entradas del sistema. La salida fue conectada a la válvula solenoide, utilizando una salida digital PWM para controlar la apertura y cierre de la válvula de manera precisa. Además, se incorporó una librería de control PID en el código, donde se ajustaron las constantes  $K_p$  y  $K_i$  para garantizar un llenado correcto y estable. En la figura 6.1 se muestra la prueba de concepto realizada.



**Figura 6.1:** Prueba de concepto realizada para la validación de métricas.

Antes de iniciar las pruebas, fue necesario calibrar la celda de carga. Para ello, se utilizó un objeto de peso conocido, lo que permitió ajustar el sistema de medición y asegurar que la celda de carga dé como resultado la lectura correcta de los pesos.

En el Apéndice C se presenta el esquema de conexiones utilizado para la prueba de concepto, mientras en el Apéndice B se incluye el código de programación del Arduino empleado para controlar el sistema durante las pruebas.

## 6.2 Prueba #1: Evaluación de precisión y configuración de peso

Para esta prueba, se realizó la validación con agua en lugar de dulce de leche debido a las condiciones específicas de este último. El dulce de leche, como ya se mencionó en este

documento, requiere estar a altas temperaturas para fluir adecuadamente, lo que imposibilita su uso en la prueba de concepto. Sin embargo, el uso de agua permite validar de manera precisa las métricas evaluadas, ya que el sistema de control, junto con la celda de carga y la válvula solenoide, trabaja de manera similar independientemente del fluido. En la implementación final, el único ajuste que sería necesario realizar es la modificación de las constantes del controlador PID ( $K_p$  y  $K_i$ ) para adaptarse al dulce de leche.

Para la primera métrica evaluada en esta prueba, el rango de ajuste del peso objetivo, se debe validar que el sistema permite establecer un valor objetivo dentro del rango de 0 a 5000 gramos. La validación del rango de ajuste del peso objetivo se realizó utilizando la programación del controlador PID en el Arduino. En esta configuración, el parámetro del *Setpoint* (valor de referencia) se establece en el código, como en la siguiente instrucción:

```
PID myPID(&Entrada, &Salida, &Setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);
```

En este fragmento, el *Setpoint* representa el peso objetivo que el sistema debe alcanzar. Este valor se puede ajustar a cualquier peso dentro del rango de 0 a 5000 gramos, tal como lo solicitó el cliente. Al tener esta capacidad en la programación, se valida que el sistema puede adaptarse a distintos pesos.

### 6.2.1 Análisis Estadístico de la Precisión de Llenado

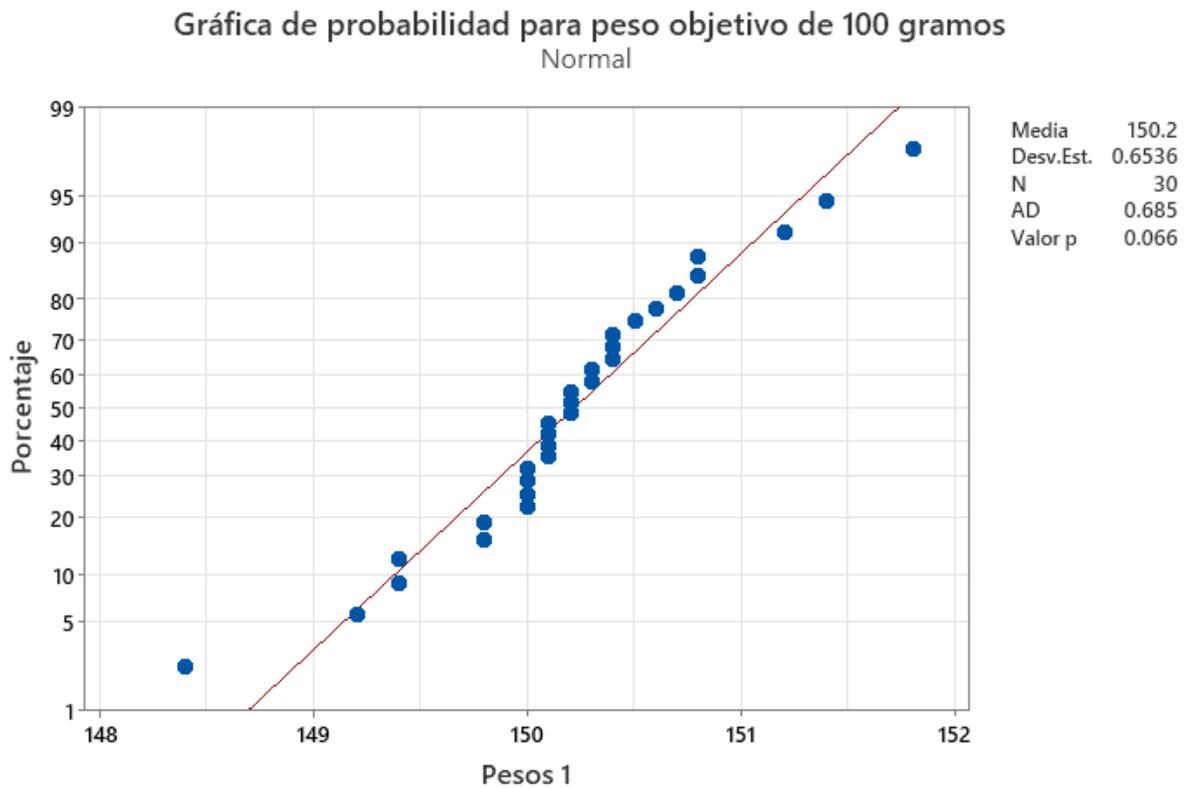
Para evaluar la precisión del llenado en esta prueba, se seleccionó un análisis estadístico empleando una prueba de hipótesis, cuyos resultados se detallan a continuación. En el análisis, se utilizaron tres pesos objetivos: 150 gramos, 300 gramos y 500 gramos. Para cada uno de estos valores, se realizaron 30 mediciones haciendo uso de la prueba de concepto, eligiendo este número de repeticiones debido a que, según el Teorema del Límite Central, una muestra de 30 datos o más permite asumir una distribución normal para la media muestral, lo cual es esencial para la validez de la prueba de hipótesis. En el apéndice A se muestran los tres conjuntos de datos tomados.

Durante cada medición, se colocó el peso objetivo en el programa, y la prueba de concepto realizó el llenado automáticamente. Una vez completado el llenado, se pesó el contenido con una balanza con una incertidumbre de  $\pm 0.1$  gramos, y este valor fue el registrado como dato

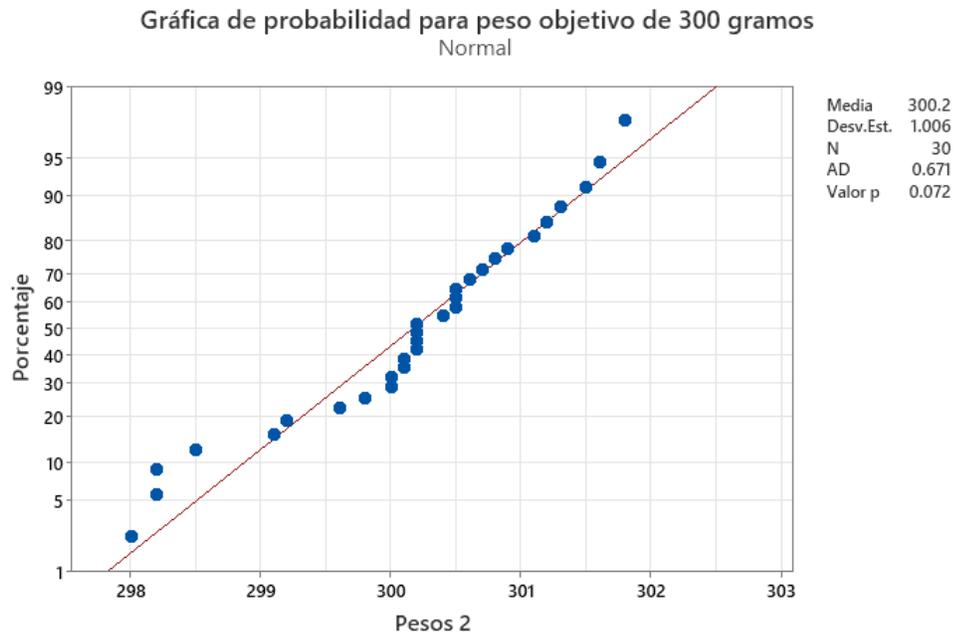
de salida.

Para el análisis estadístico, se utilizó el software de estadística Minitab. Primero, fue necesario verificar que los datos de cada conjunto (de 150, 300 y 500 gramos) siguieran una distribución normal, ya que la normalidad es un requisito para realizar la prueba de hipótesis de la media. Esta verificación se llevó a cabo mediante una prueba de normalidad en Minitab, utilizando un nivel de significancia de 0.05 para aceptar la hipótesis nula ( $H_0$ ) de que los datos son normales (se acepta normalidad si el valor  $p > 0.05$ ).

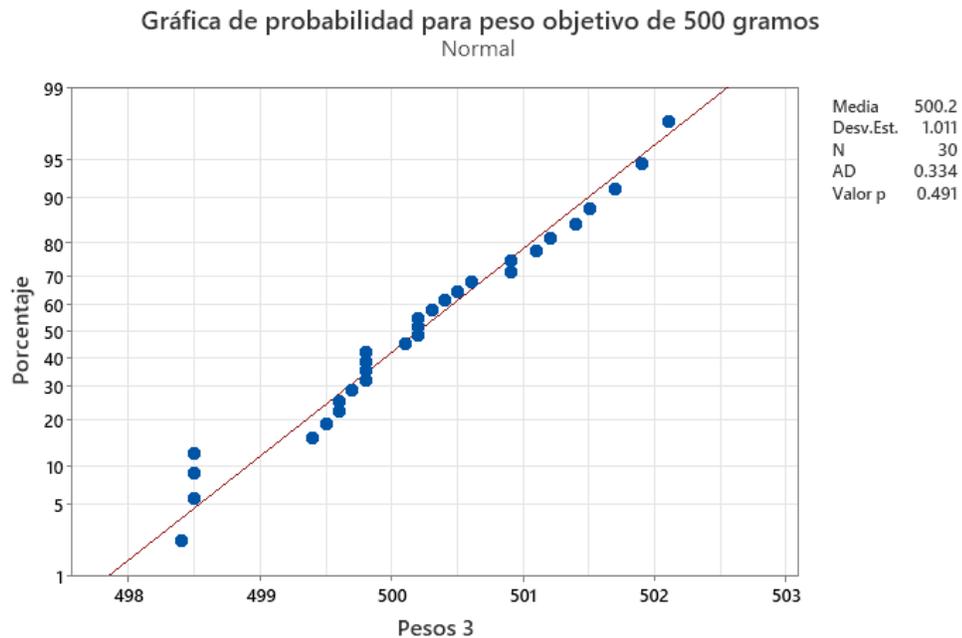
Los tres conjuntos de datos cumplieron con este criterio de normalidad, lo cual permitió avanzar a la prueba de hipótesis. En las figuras 6.2, 6.3 y 6.4 se muestran los resultados obtenidos en Minitab para esta prueba de normalidad, donde se incluye también la desviación estándar para cada uno de los conjuntos de datos.



**Figura 6.2:** Gráfica de prueba de normalidad para peso objetivo de 150 gramos.



**Figura 6.3:** Gráfica de prueba de normalidad para peso objetivo de 300 gramos.



**Figura 6.4:** Gráfica de prueba de normalidad para peso objetivo de 500 gramos.

Una vez cumplido el requisito de la normalidad de los datos, se procedió a establecer la hipótesis nula ( $H_0$ ) y la alternativa ( $H_a$ ), las cuales fueron las siguientes:

- $H_0$ :  $\mu =$  peso objetivo (150, 300, o 500 gramos)
- $H_a$ :  $\mu \neq$  peso objetivo (150, 300, o 500 gramos)

La prueba de hipótesis se realizó con un nivel de significancia de 0.05 (equivalente a un nivel de confianza del 95%). Tras ejecutar la prueba en Minitab, los resultados arrojaron valores  $p$  mayores al nivel de significancia para los tres conjuntos de datos. Esto significa que no se rechaza  $H_0$ , lo cual indica que la media de cada conjunto de datos es estadísticamente igual al peso objetivo con un 95 % de confiabilidad. En las figuras 6.5, 6.6 y 6.7 se muestran los resultados obtenidos en Minitab para la prueba de hipótesis para cada conjunto de datos.

Prueba	
Hipótesis nula	$H_0: \mu = 150$
Hipótesis alterna	$H_1: \mu \neq 150$
Valor Z	Valor p
1.85	0.064

**Figura 6.5:** Resultado de prueba de hipótesis para peso objetivo de 150 gramos.

Prueba	
Hipótesis nula	$H_0: \mu = 300$
Hipótesis alterna	$H_1: \mu \neq 300$
Valor Z	Valor p
0.91	0.361

**Figura 6.6:** Resultado de prueba de hipótesis para peso objetivo de 300 gramos.

Prueba	
Hipótesis nula	$H_0: \mu = 500$
Hipótesis alterna	$H_1: \mu \neq 500$
Valor Z	Valor p
1.10	0.270

**Figura 6.7:** Resultado de prueba de hipótesis para peso objetivo de 500 gramos.

Además, la desviación estándar de los conjuntos de datos fue de 0.65, 1.006 y 1.011 gramos para los pesos objetivos de 150, 300, y 500 gramos, respectivamente. Dado que se requiere que la desviación estándar sea menor al 2% del peso objetivo, este resultado cumple con la métrica establecida, ya que:

0.65 gramos representa un 0.43% de desviación estándar

1.006 gramos representa un 0.34% de desviación estándar

1.011 gramos representa un 0.20% de desviación estándar

De esta manera, se confirma que el sistema cumple con la métrica deseada de precisión en el llenado, manteniendo una desviación estándar menor al 2% para cada peso objetivo. Además, con un nivel de confianza del 95%, se verifica estadísticamente que la media de las mediciones es igual al peso objetivo establecido. Esto demuestra tanto la exactitud como la confiabilidad del sistema en la entrega de los pesos programados.

A continuación, el siguiente enlace muestra un video demostrativo donde se observa la prueba de concepto en funcionamiento: <https://youtu.be/HKjXREayi-A>

### 6.3 Prueba #2: Interacciones del usuario y detección

En esta prueba, se evaluaron las interacciones del usuario con el sistema, así como la capacidad de detección de galones vacíos. Para la métrica de detección de galones, se utilizó el sensor capacitivo presente en la prueba de concepto, el cual tiene un LED que se enciende cada vez que detecta un recipiente. Este sensor fue colocado en una posición específica en la prueba de concepto donde se coloca el recipiente. Se realizaron pruebas colocando distintos envases frente al sensor y, en todos los casos, se validó su detección, confirmando una tasa de detección de galones del 100%. En la tabla 6.1 se resumen las pruebas realizadas.

**Tabla 6.1:** Resultados de la detección de distintos envases con el sensor capacitivo.

Tipo de Envase u Objeto	Resultado de Detección
Botella plástica	Detectado
Envase de vidrio	Detectado
Lata de aluminio	Detectado
Recipiente plástico cuadrado	Detectado
Frasco de cerámica	Detectado
Botella de metal	Detectado
Jarra plástica	Detectado
Envase de acero inoxidable	Detectado
Taza de vidrio	Detectado
Sin envase (vacío)	No detectado

Adicionalmente, se validó la tasa de éxito de los botones de inicio y paro, los cuales permiten al usuario controlar el sistema de forma manual. Se realizaron varias combinaciones para evaluar su funcionamiento, que se resumen en la Tabla 6.2.

**Tabla 6.2:** Resultados de pruebas de detección de galones y funcionamiento de botones.

Escenario	Resultado Esperado	Resultado Obtenido
No hay recipiente y botón “start” presionado	No inicia	No inicia
Recipiente detectado y botón “start” presionado	Inicia llenado	Inicia llenado
Recipiente detectado y botón “stop” presionado	Detiene llenado	Detiene llenado
No hay recipiente y botón “stop” presionado	Sin cambios	Sin cambios
Recipiente detectado, llenado en progreso, botón “stop” presionado	Detiene llenado	Detiene llenado

Por último, se evaluó el tiempo de aprendizaje del sistema, es decir, cuánto tiempo le tomó a un usuario no familiarizado lograr utilizar el sistema para la medición de galones. Se le explicó el funcionamiento del sistema al operario encargado de la fábrica utilizando la prueba de concepto. Se le mostró cómo debía colocar el envase, cómo funcionan los botones, y se indicó en qué parte de la programación se cambiaría el valor objetivo, ya que esto sería lo único que el usuario modificaría en una implementación real. En el caso del usuario en una implementación real, esto sería a través de una interfaz de usuario (HMI). Como no se dispone de una HMI en esta prueba de concepto, se le explicó cómo se cambiaría el valor en el código, ya que de igual forma se haría con la HMI. El proceso de explicación total, incluyendo todos estos aspectos, tomó una hora, lo que cumple con el valor ideal de la métrica que establece menos de 2 horas.

## 6.4 Prueba #3: Evaluación del mantenimiento y limpieza del Sistema

Esta prueba #3 tiene como objetivo validar las métricas de tiempo medio requerido para el mantenimiento y tiempo medio requerido para la limpieza, tal como se mencionó en la sección de Metodología. En la tabla 3.3 se pueden observar los valores objetivo de estas métricas: un tiempo ideal de 2 horas o menos al mes para el mantenimiento, y un tiempo marginal de 4 horas o menos. Para la limpieza, el tiempo ideal es de 20 minutos diarios o menos, mientras que el tiempo marginal es de 20 minutos.

Dado que estas son métricas de mantenimiento y limpieza, y el diseño final planteado no se implementa físicamente, la validación se realiza de manera teórica, basada en el análisis del diseño del sistema. Para esta validación no se hizo uso del prototipo, ya que no cuenta con

los componentes industriales propuestos, como el PLC, las válvulas solenoides seleccionadas y la interfaz HMI. En su lugar, se identificaron las áreas del diseño final que requieren mantenimiento y limpieza, y se estimaron los tiempos correspondientes.

#### 6.4.1 Validación del tiempo medio requerido para el mantenimiento

En el diseño final, se identifican las siguientes áreas críticas que requieren mantenimiento periódico:

- **Calibración de las celdas de carga:** Las celdas de carga pueden experimentar desviaciones leves causadas por factores ambientales, como temperatura o vibraciones, por lo que es importante realizar calibraciones de manera anual para garantizar un correcto pesaje del producto. Este proceso incluye detener el sistema, aplicar un peso de referencia y ajustar los parámetros hasta que las celdas de carga indiquen el peso correcto. Se estima que este proceso toma aproximadamente entre 1 y 2 horas anuales, ya que el ajuste es sencillo, lo que equivale a un promedio mensual de aproximadamente 10 minutos, distribuyendo el tiempo requerido para su calibración anual.
- **Revisión de válvula solenoide:** La válvula solenoide controla el flujo de dulce de leche y es un componente crítico, ya que debe abrir y cerrar de manera precisa para garantizar que el llenado sea exacto y no haya fugas. El mantenimiento mensual incluye una revisión visual para detectar desgaste o fugas, limpieza de los conductos internos para evitar acumulación de residuos, y pruebas de funcionamiento. Este proceso puede tomar 1 hora al mes debido a la necesidad de desmontar la válvula para su limpieza, revisar los componentes internos, y realizar pruebas para asegurar que está funcionando correctamente.
- **Revisión del PLC y conexiones eléctricas:** Para el caso del mantenimiento de los PLC, estos debido a su robusta construcción, normalmente no tienen necesidad de un mantenimiento intensivo. Sin embargo, es recomendable realizar una revisión mensual para verificar que no haya problemas en las conexiones eléctricas (falta de continuidad, corrosión, etc.) y que el PLC esté ejecutando correctamente los programas de control.

Esta revisión preventiva se estima que podría tomar entre 15 a 30 minutos al mes, ya que consiste en una inspección superficial y verificación de la correcta ejecución del software.

- **Revisión de sensores de proximidad:** Los sensores de proximidad detectan cuando un galón vacío está en posición para ser llenado. Estos sensores, a pesar de que son bastante confiables, pueden ensuciarse o desalinearse debido a la acumulación de residuos o vibraciones en el entorno de trabajo. La limpieza y ajuste de estos sensores para garantizar su correcto funcionamiento es un proceso relativamente rápido, estimado en máximo 10 minutos al mes. Esto incluye limpiar los sensores, verificar su alineación (y corregir en caso de ser necesario), y hacer pruebas de detección para asegurarse de que responden correctamente.

Sumando estas actividades, el tiempo total estimado para el mantenimiento del diseño final es de aproximadamente 1.5 a 2 horas por mes, lo que cumple con el valor ideal establecido de  $\leq 2$  horas al mes.

#### 6.4.2 Validación del tiempo medio requerido para la limpieza

Para el caso de la validación del tiempo medio requerido para la limpieza, dado que se trata de un sistema en la industria alimentaria, esta debe realizarse de manera diaria para garantizar la higiene y evitar la contaminación. Sin embargo, el diseño propuesto se ha desarrollado de forma que no sea necesaria una limpieza extensa, cumpliendo así con lo solicitado por el cliente. Solo es necesario realizar una limpieza periódica de los siguientes componentes:

- **Salida de la válvula solenoide y acople:** La limpieza de la salida de la válvula seleccionada y el acople que conecta con la salida de la marmita, consiste en abrir la válvula, enjuagar la boquilla de salida y el acople con agua y productos de limpieza adecuados, asegurando que no queden residuos de dulce de leche que puedan causar obstrucciones. Este proceso está diseñado para ser rápido, tomando aproximadamente 15 minutos al día. Esta estimación de tiempo se basa en la observación realizada durante la visita a la fábrica, donde se verificó que el tiempo actual requerido para limpiar la salida de la marmita es de aproximadamente 15 minutos. Dado que el

sistema propuesto solo incorpora la válvula solenoide y el acople en la salida de la marmita, y considerando que estos componentes funcionan como un hueco pasante, el proceso de limpieza es prácticamente el mismo que el procedimiento actual. Por lo tanto, se ha establecido el mismo tiempo estimado de 15 minutos para esta tarea.

Los demás componentes del sistema, como la pantalla, los botones, la celda de carga y los sensores, no requieren limpieza regular, dado que no entran en contacto directo con el dulce de leche. Por lo tanto, de esta forma se valida que el tiempo total de limpieza diario cumple con la métrica establecida de menos de 20 minutos.

## 6.5 Prueba #4: Validación del control automático

La presente prueba tiene como objetivo validar las métricas de tiempo de respuesta del control y tiempo de llenado, tal como se mencionó en la sección de Metodología. En la tabla 3.3 se pueden observar los valores objetivo de estas métricas: un tiempo de 15 segundos o menor para el tiempo de llenado, y un tiempo de respuesta de control de 6 segundos o menos.

Para el tiempo de llenado, se consideró el periodo que transcurre desde el inicio del proceso (tiempo  $t = 0$ ) hasta que se alcanzó un valor final correspondiente al 99.5% del peso objetivo (5 kg). Este umbral implica un margen de error aceptable del 0.5%, lo que asegura una dosificación sumamente precisa del dulce de leche. La validación se ejecutó utilizando el software MATLAB, garantizando que se aplicaron los mismos valores calculados en la sección de diseño, incluyendo las constantes del controlador PID,  $K_p$  y  $K_i$ .

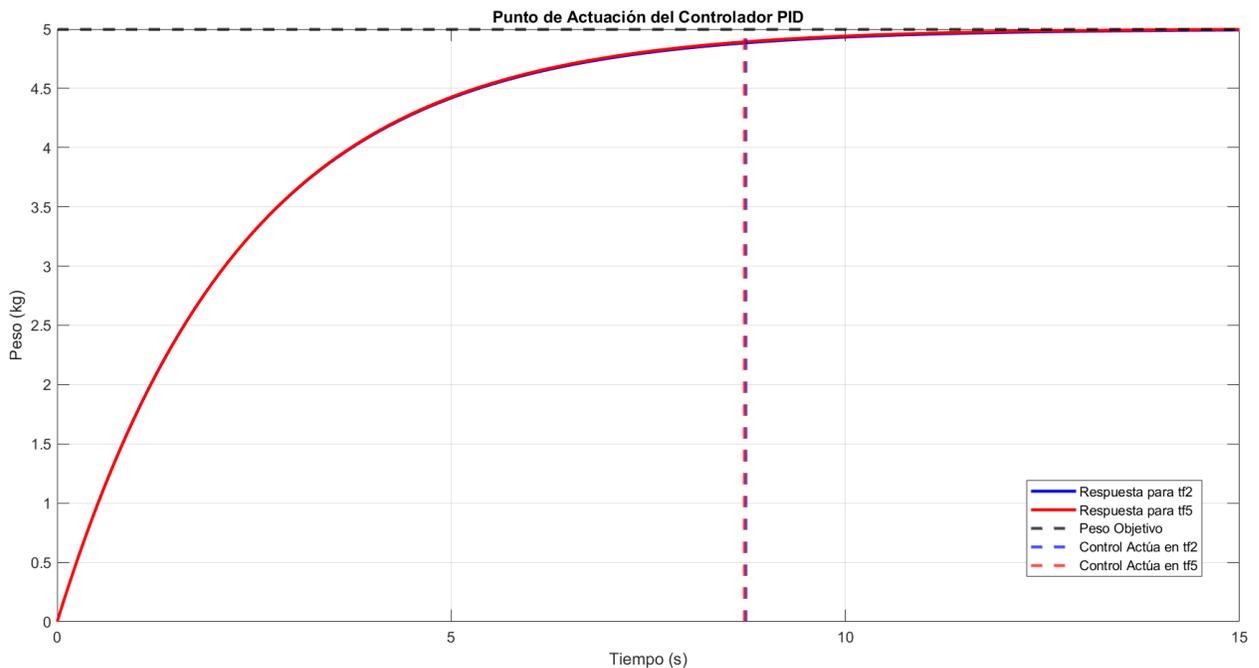
En cuanto al tiempo de control, este se determinó observando el inicio de la acción del controlador automático. Se definió que el control comenzaba cuando la pendiente de la gráfica de respuesta del sistema disminuía significativamente, indicando que la válvula proporcional empezaba a regular el flujo de dulce de leche para alcanzar el peso objetivo de manera precisa. Este punto representa la transición del sistema de un estado de llenado por gravedad a un control activo mediante la válvula.

La implementación del control automático sigue la lógica presentada en la figura 4.23, donde el controlador diseñado se conecta en serie con la función de transferencia calculada. Este

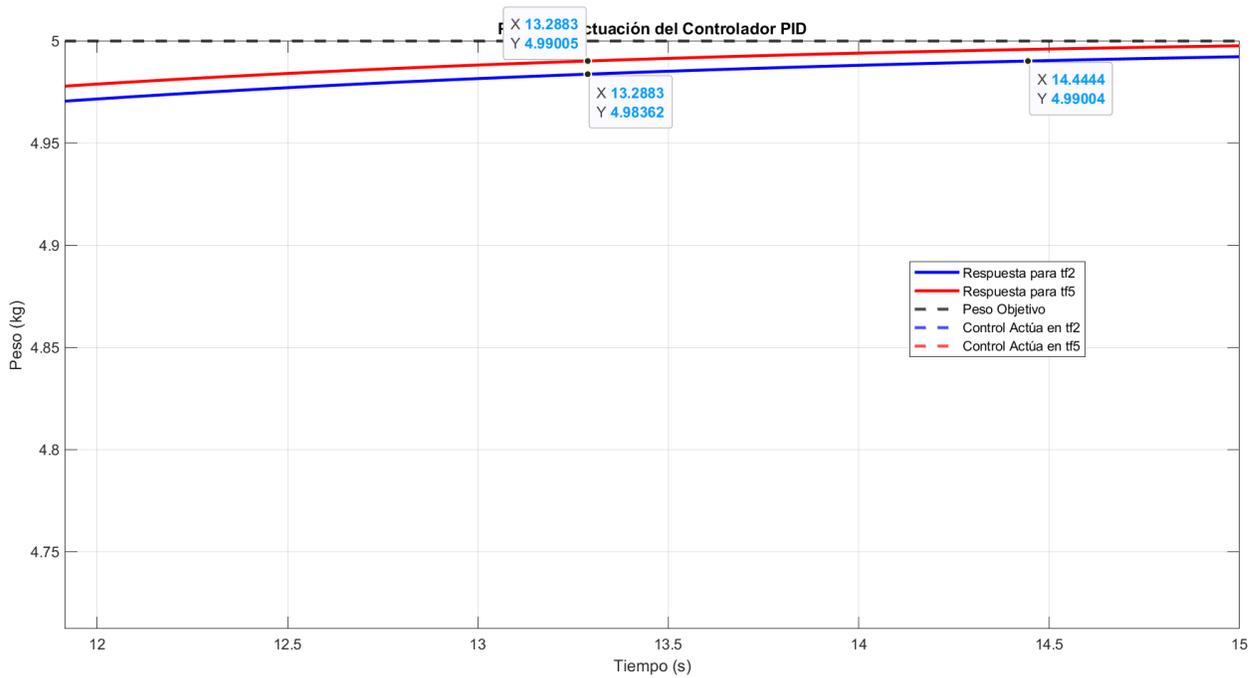
arreglo permite establecer un lazo de realimentación que ajusta continuamente el sistema, asegurando que el llenado se mantenga en el peso deseado.

Tal como se mencionó en la sección de diseño del control automático, se llevaron a cabo dos tomas de datos principales: una al inicio del proceso y otra al final del mismo. Este enfoque permitió obtener dos funciones de transferencia que contemplan todas las variables del proceso. A partir de estos datos, se verificó si el control automático propuesto se adaptaba efectivamente a ambas funciones de transferencia, validando así su funcionalidad.

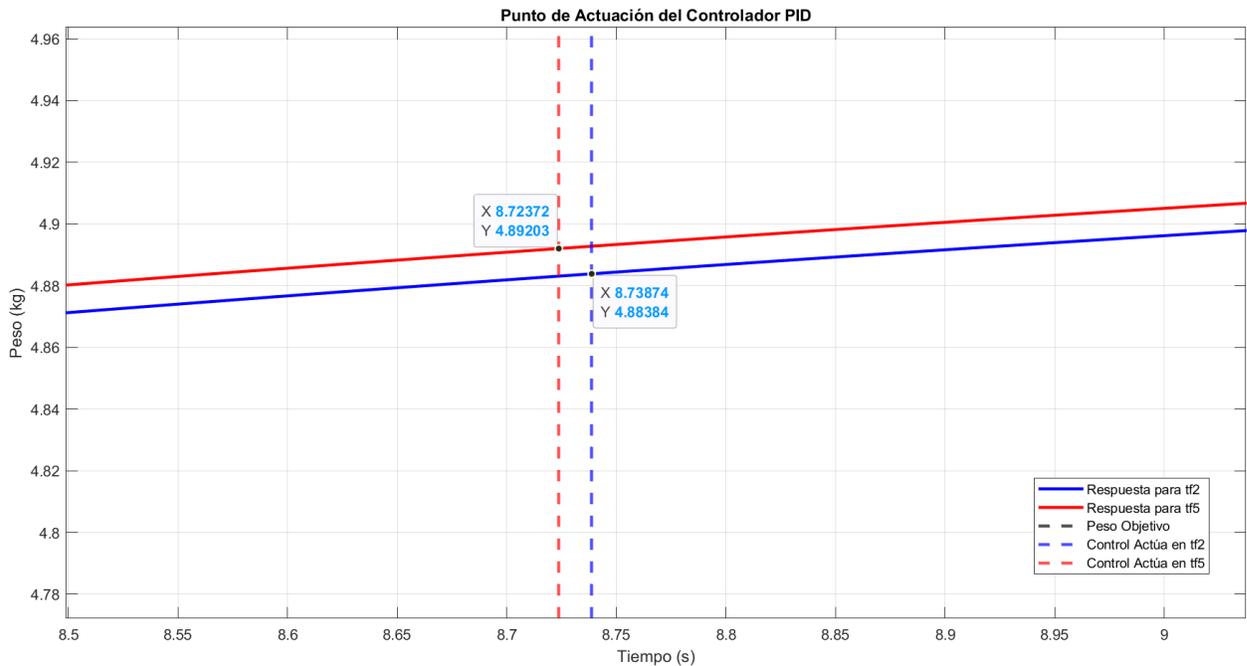
A continuación, se presentan los resultados de la simulación en MATLAB del comportamiento del sistema de control. En la figura 6.8, se observa la gráfica completa de la simulación del proceso de llenado y control. La figura 6.9 muestra el tiempo específico que tardó en alcanzar el 99.5% del peso objetivo (4.99 kg, de un total de 5 kg). Finalmente, en la figura 6.10, se detalla el punto en el que se activó el control automático para regular el flujo de dulce de leche.



**Figura 6.8:** Gráfica completa de la simulación del proceso de llenado y control.



**Figura 6.9:** Tiempo de llenado final obtenido por simulación en Matlab.



**Figura 6.10:** Tiempo de inicio de control obtenido por simulación en Matlab.

Posteriormente, se presenta en la tabla 6.3 una tabla resumen de los resultados obtenidos después de esta validación. Recordar que TF1 y TF2 corresponden a las funciones de transferencia determinadas en la sección de diseño. En las imágenes de esta simulación, los nombres que se colocaron a las funciones de transferencia son tf2 y tf5, donde tf2 corresponde a TF1 y tf5 corresponde a TF2.

**Tabla 6.3:** Tiempos obtenidos en Matlab para el control automático diseñado.

Función de transferencia	Tiempo de inicio de control (s)	Tiempo total de llenado (s)	Tiempo de control (s)
<i>TF1</i>	8.72	13.28	4.56
<i>TF2</i>	8.73	14.44	5.71

Como se puede observar en la tabla anterior, el sistema de control automático diseñado cumple con las métricas establecidas para ambas funciones de transferencia determinadas. El tiempo de llenado es inferior a los 15 segundos especificados, mientras que el tiempo de respuesta del control es menor a los 6 segundos. Estos resultados validan que el control propuesto satisface los requisitos planteados en la metodología.

## 6.6 Resumen de validaciones

En la tabla 6.4 se presenta un resumen de los resultados obtenidos tras la validación del sistema. Estos resultados se compararon con los valores objetivos establecidos para cada métrica en la metodología. Todos los valores objetivos fueron cumplidos, lo que indica que el sistema desarrollado satisface de manera adecuada las necesidades identificadas.

**Tabla 6.4:** Resumen de validaciones para métricas y valores objetivo.

# Métrica	Métrica	Unidades	Valor Marginal	Valor Ideal	Valor Obtenido	Cumplimiento
1	Precisión del llenado (desviación estándar)	%	$\pm 2$	0.1	0.43 , 0.34, 0.2	Cumple
2	Tiempo de llenado	segundos	15	$\leq 15$	13.28, 14.44	Cumple
3	Tiempo de aprendizaje	horas	$< 4$	$\leq 2$	1	Cumple
4	Tiempo medio requerido de mantenimiento	horas/mes	$< 4$	$\leq 2$	2	Cumple
5	Tiempo medio requerido de limpieza	mins	20	$< 20$	15	Cumple
6	Rango de ajuste del peso objetivo	grs	0-5000	0-5000	0-5000	Cumple
7	Tiempo de respuesta del control	segundos	6	$< 6$	4.56, 5.71	Cumple
8	Tasa de éxito de los botones	%	$\geq 90$	100	100	Cumple
9	Tasa de detección de galones	%	$\geq 90$	100	100	Cumple
10	Funcionamiento con energía eléctrica	Binario	Sí	Sí	Sí	Cumple

# Capítulo 7

## Conclusiones y recomendaciones

### 7.1 Conclusiones

- Se desarrolló un sistema automatizado de llenado de galones de dulce de leche que, con un nivel de confianza del 95%, demostró una media de mediciones igual al peso objetivo y una desviación estándar menor al 2%, lo que evidencia la repetibilidad y reproducibilidad del proceso.
- Se diseñó de manera eficiente un control automático que logró cumplir con un tiempo de llenado promedio de 13.28 segundos y 14.44 segundos para las funciones de transferencia, así como un tiempo de control de 4.56 segundos y 5.71 segundos, satisfaciendo así las necesidades establecidas del proceso por el cliente.
- Se logró una tasa de éxito del 100% tanto en la detección de galones como en los botones de inicio y paro mediante la validación del sistema automatizado, evidenciando la robustez y fiabilidad del diseño.
- Se validó que la implementación del sistema automatizado resulta en una alta rentabilidad, permitiendo una reducción de costos por la eliminación del sobrellenado, lo que representaría un ahorro aproximado de 45,000 dólares al año, es decir, un ROI de 3446%.

## 7.2 Recomendaciones

- A pesar de que en este documento se calcularon constantes teóricas para el controlador automático ( $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$ ), se recomienda llevar a cabo pruebas prácticas una vez implementado el diseño. Esto permitirá verificar el correcto funcionamiento de dichas constantes y realizar ajustes si es necesario para optimizar el rendimiento del sistema.
- Se recomienda considerar la implementación de una banda transportadora para mejorar la eficiencia del proceso de llenado, facilitando el movimiento de galones vacíos hacia el área de llenado y el traslado de galones llenos al área de almacenamiento.
- Se recomienda como mejora a la fábrica en su proceso de automatización, la inclusión de un sensor de temperatura en la línea de llenado de dulce de leche. Este sensor proporcionaría datos en tiempo real sobre la temperatura del producto, lo cual es importante para mantener la calidad y consistencia del dulce de leche.

# Bibliografía

- [1] C. de Comercio de Costa Rica. La importancia de las pymes en costa rica. (2022). [En línea]. Disponible: <https://camara-comercio.com/la-importancia-de-las-pymes-en-costa-rica-2/>
- [2] M. Ortiz, “(comunicación privada),” 2024.
- [3] INSEGE, “Marmita,” 2024. [En línea]. Disponible: <https://insege.net/marmita/>
- [4] C. Technology. ¿en qué consiste el proceso de dosificación? (2022). [En línea]. Disponible: <https://www.chumillastechnology.com/blog/en-que-consiste-el-proceso-de-dosificacion/>
- [5] CDA. Técnicas de llenado de cda. (2023). [En línea]. Disponible: <https://cdafrance.com/es/actualidades-de-cda-fabricante-de-maquinas-de-etiquetado/tecnicas-de-llenado-de-cda/#:~:text=Dosificaci%C3%B3n%20por%20peso,precisi%C3%B3n%20inigualable%20del%20producto%20dosificado.>
- [6] C. de Ministros de Integración Económica. Reglmento técnico centroamericano. (2006). [En línea]. Disponible: [https://www.comex.go.cr/media/3336/181\\_rtca-anexo-33.pdf](https://www.comex.go.cr/media/3336/181_rtca-anexo-33.pdf)
- [7] CSA. El uso del acero inoxidable en la industria alimentaria. (2020). [En línea]. Disponible: <https://csaconsultores.com/uso-del-acero-inoxidable-la-industria-alimentaria/>
- [8] E. CARBONE. ¿cómo elegir el mejor tipo de acero inoxidable para tus productos? (2023). [En línea]. Disponible: [https://carbonestore.cr/blogs/news/como-elegir-el-mejor-tipo-de-acero-inoxidable-para-tus-productos?srsltid=AfmBOooWLOeY570J2f5\\_IM6K1lB0GdbqkwYxA5EPTOmbKse8LGTiAjX](https://carbonestore.cr/blogs/news/como-elegir-el-mejor-tipo-de-acero-inoxidable-para-tus-productos?srsltid=AfmBOooWLOeY570J2f5_IM6K1lB0GdbqkwYxA5EPTOmbKse8LGTiAjX)

- [9] G. Industrias. ¿qué es un plc y cómo funciona? (2021). [En línea]. Disponible: <https://industriasgsl.com/blogs/automatizacion/que-es-un-plc-y-como-funciona?srsId=AfmBOoq3iY24tAMvGxvjsy41oWnMbZGQdRoRpJYHNnGCm5LcI0Yqfu>
- [10] C3Controls. Microcontroladores versus plc: una comparación detallada. (2024). [En línea]. Disponible: <https://www.c3controls.com/es/documento-tecnico/microcontroladores-versus-plc-una-comparacion-detallada/>
- [11] COPADATA. ¿qué es una hmi? (2019). [En línea]. Disponible: <https://www.copadata.com/es/productos/zenon-software-platform/visualizacion-control/que-significa-hmi-interfaz-humano-maquina-copa-data/#:~:text=HMI%20son%20las%20siglas%20de,para%20las%20de%20entornos%20industriales.>
- [12] Agruquero. Válvulas manuales y válvulas automáticas: usos y características. (2022). [En línea]. Disponible: <https://agruquero.com/valvulas-manuales-y-valvulas-automaticas-usos-y-caracteristicas/>
- [13] COPADATA. Válvulas de compuerta automáticas versus manuales: ¿cuál elegir? (2024). [En línea]. Disponible: <https://sioval.com/valvulas-de-compuerta-automaticas-versus-manuales-cual-elegir/>
- [14] J.-W. Pustjens. La diferencia entre los tipos de electroválvulas. (2024). [En línea]. Disponible: <https://www.copadata.com/es/productos/zenon-software-platform/visualizacion-control/que-significa-hmi-interfaz-humano-maquina-copa-data/#:~:text=HMI%20son%20las%20siglas%20de,para%20las%20de%20entornos%20industriales.>
- [15] ElecProy. Los tipos de sensores más usados: definición y funcionalidad. (2024). [En línea]. Disponible: <https://elecproy.com/es/blog/tipos-de-sensores/>
- [16] DirectIndustry. Qué sensor de proximidad elegir. (2019). [En línea]. Disponible: <https://guide.directindustry.com/es/que-sensor-de-proximidad-elegir/>
- [17] Flintec. ¿cómo funciona una celda de carga? (2022). [En línea]. Disponible: <https://www.flintec.com/es/aprender/sensor-de-peso/celulas-de-carga>

- [18] EMAC. Sistemas de control automático. (2021). [En línea]. Disponible: [https://emacstores.com/sistemas-de-control-automatgico/?srsltid=AfmBOorNI4DF8KSdH\\_HhlACjORycwl6\\_EUBgiekeDuFJ12ZJXP9hQ1Gg](https://emacstores.com/sistemas-de-control-automatgico/?srsltid=AfmBOorNI4DF8KSdH_HhlACjORycwl6_EUBgiekeDuFJ12ZJXP9hQ1Gg)
- [19] N. Instruments. Sistemas de control automático. (2024). [En línea]. Disponible: <https://www.ni.com/es/shop/labview/pid-theory-explained.html>
- [20] S. Castaño. Teoría pid explicada. (2017). [En línea]. Disponible: <https://controlautomaticoeducacion.com/analisis-de-sistemas/funcion-de-transferencia/>
- [21] K. Ulrich and S. Eppinger, *Product Design and Developement*, 6th ed. New York: McGrawHill Education, 2016.
- [22] EUROCLIMA. Electricidad en costa rica. (2024). [En línea]. Disponible: <https://www.euroclima.org/encuentrocostarica2019/logistica-costarica/item/548-electricidad-cr#:~:text=Aqu%C3%AD%20encontrar%C3%A1%20qu%C3%A9%20tipo%20de,corriente%20alterna%20para%20Costa%20Rica.&text=En%20Costa%20Rica%20el%20voltaje,La%20frecuencia%20es%2060%20Hz>.
- [23] MicroJPM. Ljc18a3-h-z/bx 3-wire 10mm capacitive proximity sensor switch npn dc n.o. (2024). [En línea]. Disponible: <https://www.microjpm.com/products/ljc18a3-b-z-bx-3-wire-10mm-capacitive-proximity-sensor-switch-npn-dc-no-300ma/>
- [24] PLCCity. 6av2123-2gb03-0ax0 siemens. (2024). [En línea]. Disponible: <https://www.plc-city.com/shop/es/siemens-simatic-hmi-basic-panels-2nd-generation/6av2123-2gb03-0ax0.html#>
- [25] MicroJPM. Apbb-22&25n light indicator start/stop push button power on/off. (2024). [En línea]. Disponible: <https://www.microjpm.com/products/ad34388/>
- [26] H. Flo. Hsh-flo 1/2'' 3/4'' 1'' 1-1/4'' 1-1/2'' 2'' 3'' 24vac/dc 110vac/220vac 0-10v/4-20ma 2 way cf8 proportional integral control motorized ball valve. (2024). [En línea]. Disponible: <https://hshflo.com/collections/4-20ma-1/products/hsh-flo-1-2-3-4-1-24vac-dc-110vac-220vac-4-20ma-2-way-cf8-npt-proportional-integral-control-mo>
- [27] Autycom. Simatic s7-1200, cpu 1214c, ac/dc/rly. (2024). [En línea]. Disponible: <https://www.autycom.com/producto/cpu-simatic-6es7214-1bg40-0xb0-siemens/>

- [28] Siemens. 6es7232-4ha30-0xb0. (2024). [En línea]. Disponible: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/6ES7232-4HA30-0XB0>
- [29] MicroJPM. Load cell - 10kg straight bar. (2024). [En línea]. Disponible: <https://www.microjpm.com/products/ad28634/>
- [30] A. Stykemain. Capacitive sensor explained — different types and applications. (2021). [En línea]. Disponible: <https://www.realpars.com/blog/capacitive-sensor>
- [31] N. Mechatronics. Módulo hx711 transmisor de celda de carga. (2023). [En línea]. Disponible: <https://naylampmechatronics.com/fuerza-peso/147-modulo-hx711-transmisor-de-celda-de-carga.html#:~:text=El%20HX711%20es%20un%20transmisor,confiables%20y%20con%20buena%20precisi%C3%B3n.>

# Apéndice A

## Datos experimentales

**Tabla A.1:** Datos experimentales tomados en la fábrica de dulce de leche al inicio del proceso.

Entrada escalón	Tiempo ( $\pm 0.1$ ) s	Peso ( $\pm 0.001$ ) kg
0	0.0	0.000
1	0.1	0.017
1	0.2	0.113
1	0.3	0.230
1	0.4	0.356
1	0.5	0.401
1	0.6	0.429
1	0.7	0.452
1	0.8	0.494
1	0.9	0.551
1	1.0	0.618
1	1.1	0.686
1	1.2	0.750
1	1.3	0.810
1	1.4	0.866
1	1.5	0.919
1	1.6	0.970
1	1.7	1.021
1	1.8	1.072
1	1.9	1.123
1	2.0	1.174
1	2.1	1.227
1	2.2	1.280
1	2.3	1.332
1	2.4	1.383
1	2.5	1.433
1	2.6	1.481
1	2.7	1.528
1	2.8	1.576
1	2.9	1.624
1	3.0	1.673
1	3.1	1.724

**Tabla A.2:** Datos experimentales tomados en la fábrica de dulce de leche al final del proceso.

Entrada escalón	Tiempo ( $\pm 0.1$ ) s	Peso ( $\pm 0.001$ ) kg
0	0.0	0.000
1	0.1	0.023
1	0.2	0.126
1	0.3	0.240
1	0.4	0.377
1	0.5	0.421
1	0.6	0.449
1	0.7	0.462
1	0.8	0.505
1	0.9	0.565
1	1.0	0.631
1	1.1	0.699
1	1.2	0.759
1	1.3	0.822
1	1.4	0.874
1	1.5	0.931
1	1.6	0.980
1	1.7	1.029
1	1.8	1.078
1	1.9	1.129
1	2.0	1.180
1	2.1	1.231
1	2.2	1.284
1	2.3	1.337
1	2.4	1.390
1	2.5	1.438
1	2.6	1.486
1	2.7	1.536
1	2.8	1.586
1	2.9	1.637
1	3.0	1.687
1	3.1	1.737

**Tabla A.3:** Datos obtenidos para prueba de concepto con valor objetivo de 150 gramos.

Valor objetivo (g)	Valor obtenido ( $\pm 0.1$ ) g
150	150.5
150	149.4
150	148.4
150	150.0
150	150.3
150	150.1
150	150.2
150	151.2
150	150.6
150	150.8
150	150.4
150	149.8
150	150.2
150	151.4
150	150.1
150	150.8
150	150.4
150	150.1
150	151.8
150	150.7
150	150.2
150	150.0
150	149.4
150	149.2
150	150.1
150	150.0
150	150.3
150	150.4
150	150.0
150	149.8

**Tabla A.4:** Datos obtenidos para prueba de concepto con valor objetivo de 300 gramos.

Valor objetivo (g)	Valor obtenido ( $\pm 0.1$ ) g
300	299.2
300	298.5
300	300.5
300	300.7
300	300.2
300	301.5
300	300.9
300	301.6
300	300.5
300	300.2
300	300.0
300	300.1
300	299.6
300	299.8
300	301.8
300	299.1
300	298.2
300	300.1
300	300.5
300	300.4
300	298.0
300	298.2
300	300.2
300	301.2
300	300.6
300	300.2
300	300.0
300	301.1
300	301.3
300	300.8

**Tabla A.5:** Datos obtenidos para prueba de concepto con valor objetivo de 500 gramos.

Valor objetivo (g)	Valor obtenido ( $\pm 0.1$ ) g
500	499.6
500	498.5
500	499.8
500	500.2
500	501.1
500	499.5
500	501.2
500	500.2
500	500.3
500	500.9
500	500.4
500	500.5
500	499.8
500	500.2
500	500.9
500	499.8
500	498.4
500	501.7
500	501.5
500	501.9
500	502.1
500	500.6
500	500.1
500	501.4
500	499.4
500	499.7
500	498.5
500	499.6
500	498.5
500	499.8

# Apéndice B

## Programación

### B.1 Programación en Matlab para control automático.

```
1 % Definición de peso objetivo (5 kg)
2 peso_objetivo = 5; % 5 kg
3
4 % Controlador PID utilizando PIDTuner
5 %C = pidtune(tf2, 'PID'); % Ajustar el controlador PID para tf2 que
   sera
6 %el mismo para tf2 y tf5
7
8 % Simulación del sistema en lazo cerrado con el mismo controlador
   PID para ambos sistemas
9 T_tf2 = feedback(C * tf2, 1); % Lazo cerrado con PID para tf2
10 T_tf5 = feedback(C * tf5, 1); % Lazo cerrado con PID para tf5
11
12 % Simulación con entrada escalon que representa el peso objetivo
13 t = linspace(0, 15, 1000); % Tiempo de simulación
14 input = peso_objetivo * ones(size(t)); % Entrada escalon de 5 kg
15
16 % Simulación de respuesta del sistema con el controlador PID para
   cada tf
17 [response_tf2, ~] = lsim(T_tf2, input, t);
```

```
18 [response_tf5, ~] = lsim(T_tf5, input, t);
19
20 % Calcular la derivada de la respuesta (cambio de peso en funcion
    del tiempo)
21 derivada_tf2 = diff(response_tf2) ./ diff(t);
22 derivada_tf5 = diff(response_tf5) ./ diff(t);
23
24 % Umbral para detectar una caida significativa en la pendiente
25 threshold = 0.05;
26
27 % Primer punto donde la derivada es menor que el umbral
28 idx_control_tf2 = find(derivada_tf2 < threshold, 1); % Punto donde
    comienza el control para tf2
29 idx_control_tf5 = find(derivada_tf5 < threshold, 1); % Punto donde
    comienza el control para tf5
30
31 % Grafica de la respuesta del sistema y marcar el punto donde el
    controlador comienza a actuar
32 figure;
33 plot(t, response_tf2, 'b-', 'LineWidth', 2); % Respuesta del
    sistema tf2
34 hold on;
35 plot(t, response_tf5, 'r-', 'LineWidth', 2); % Respuesta del
    sistema tf5
36 yline(peso_objetivo, 'k--', 'LineWidth', 2); % Linea del peso
    objetivo
37 xline(t(idx_control_tf2), 'b--', 'LineWidth', 2); % Punto donde el
    controlador actua (tf2)
38 xline(t(idx_control_tf5), 'r--', 'LineWidth', 2); % Punto donde el
    controlador actua (tf5)
39 xlabel('Tiempo (s)');
40 ylabel('Peso (kg)');
41 title('Punto de Actuacion del Controlador PID');
```

```
42 legend('Respuesta para tf2', 'Respuesta para tf5', 'Peso Objetivo',  
        'Control Actua en tf2', 'Control Actua en tf5');  
43 grid on;
```

## B.2 Programación en Arduino para la prueba de concepto.

```
1 //Prueba de Concepto  
2 //Llenadora de Dulce de Leche  
3 // II-2024  
4 //Jose Esteban Cubero  
5  
6 //Primero se incluyen las librerias necesarias  
7 #include "HX711.h"  
8 #include "PID_v1.h"  
9  
10 //Se declaran todas las variables necesarias  
11 int pinValve = 13; //Valvula solenoide  
12 int pinCap = 12; //Sensor capacitivo  
13 int pinStop = 8; //Boton de parada  
14 int pinStart = 9; //Boton de arranque  
15 int DT = 6; //Senal de datos de Hx711  
16 int CLK = 7; //Senal de reloj de Hx711  
17 bool PID_ON = false; //Senal para activar el PID  
18 bool Encendido_manual = false;  
19 int lectura_peso; //Variable para almacenar lectura de peso  
20 HX711 celda_carga; //Objeto de modulo Hx711  
21 double Setpoint, Entrada, Salida; //Variables para objeto PID  
22 //El control PID cuenta con constantes kp=315, ki=0, kd=0  
23 PID myPID(&Entrada, &Salida, &Setpoint, 315, 0, 0, DIRECT); //  
    Declaracion de objeto PID
```

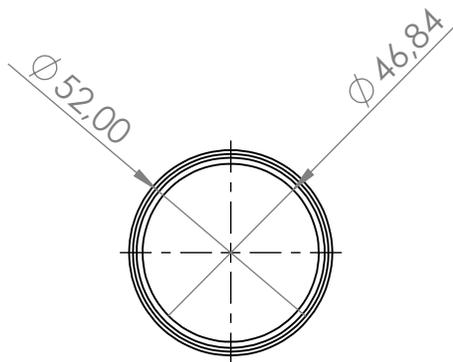
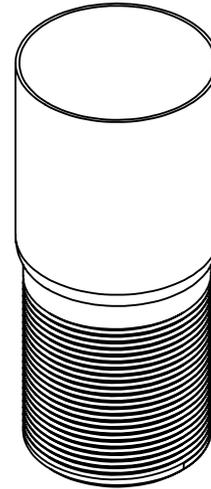
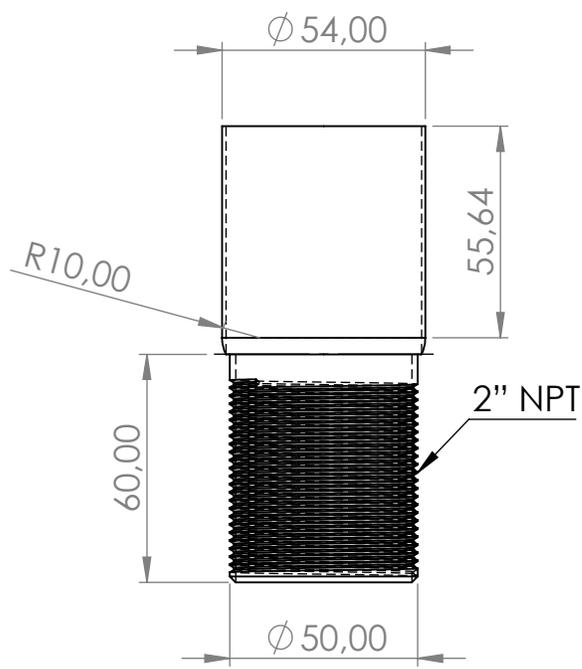
```
24 int ventana_tiempo = 5000; //Ventana de 5 segundos para el control
    PID
25 unsigned long tiempo_inicial, tiempo_actual; //Variables para
    almacenar tiempo inicial y actual
26 char userInput;
27
28 void setup() {
29     //Inicializacion de pines y componentes
30     //Tasa de datos de comunicacion serial
31     Serial.begin(9600);
32     //Modo de pines digitales de la placa
33     pinMode(pinValve, OUTPUT);
34     pinMode(pinStop, INPUT);
35     pinMode(pinStart, INPUT);
36     pinMode(pinCap, INPUT);
37     //Configuracion de modulo Hx711
38     celda_carga.begin(DT, CLK);
39     celda_carga.set_scale(1909.08); //Factor de escala obtenido luego
        de realizar multiples pruebas (calibracion)
40     celda_carga.tare(); //Se tara la balanza
41     //Variables relacionadas al PID
42     tiempo_inicial = millis(); //ms
43     Setpoint = 50; //peso deseado en gramos, en este caso se
        colocaron 50g
44     //Limite de salida del PID
45     myPID.SetOutputLimits(0, ventana_tiempo);
46     myPID.SetMode(AUTOMATIC);
47 }
48
49 void loop() {
50     //loop principal que se repite infinitamente
51     //Lectura de balanza con celda de carga
52     lectura_peso = celda_carga.get_units();
53
```

```
54  if(Serial.available()> 0){
55
56      userInput = Serial.read();
57      if(userInput == 'o'){
58          Encendido_manual = true;
59      }
60      if(userInput == 'x'){
61          Encendido_manual = false;
62      }
63  }
64
65  //El control/proceso se habilita con el boton de inicio y el
        sensor capacitivo
66  if ((digitalRead(pinStart) == HIGH) and (digitalRead(pinCap) ==
        LOW)) {
67      PID_ON = true;
68  }
69
70  // El proceso se desactiva con el boton de parada o si se alcanza
        el peso objetivo
71  if ((digitalRead(pinStop) == HIGH) || (lectura_peso >= Setpoint)) {
72      PID_ON = false;
73      digitalWrite(pinValve, LOW); // Asegurar que la valvula este
        cerrada
74  }
75
76  // Si el PID esta activo, hacer la lectura de la celda de carga y
        ejecutar el calculo PID
77  if (PID_ON) {
78      Entrada = lectura_peso; // Asignar la lectura de peso a la
        entrada del PID
79      myPID.Compute(); // Calcular la salida del PID
80  } else {
```

```
81     Salida = 0; // Si el PID esta desactivado, establecer la salida
        a cero
82 }
83
84 // Obtener el tiempo actual en milisegundos desde que se inicio el
        sistema
85 tiempo_actual = millis();
86
87 // Control de tiempo para crear una ventana de tiempo para el
        funcionamiento del sistema
88 if (tiempo_actual - tiempo_inicial > ventana_tiempo) {
89     tiempo_inicial += ventana_tiempo; // Actualizar el tiempo
        inicial para la siguiente ventana
90 }
91
92 // Control de la valvula basado en la salida del PID o en el modo
        manual
93 if ((Salida > tiempo_actual - tiempo_inicial) || (Encendido_manual))
        {
94     digitalWrite(pinValve, HIGH); // Abrir la valvula si la salida
        del PID lo requiere o si esta en modo manual
95 } else {
96     digitalWrite(pinValve, LOW); // Cerrar la valvula en caso
        contrario
97 }
98
99 // Imprimir la lectura de peso actual en el monitor serial para
        supervision
100 Serial.print("Lectura de peso:\t");
101 Serial.print(lectura_peso, 1); // Mostrar la lectura de peso con un
        decimal
102 Serial.println(" g.");
```

# Apéndice C

## Planos



**TEC** | Tecnológico de Costa Rica

ESCUELA DE INGENIERIA MECATRÓNICA

REVISIÓN:

CURSO:  
PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN

**G3**

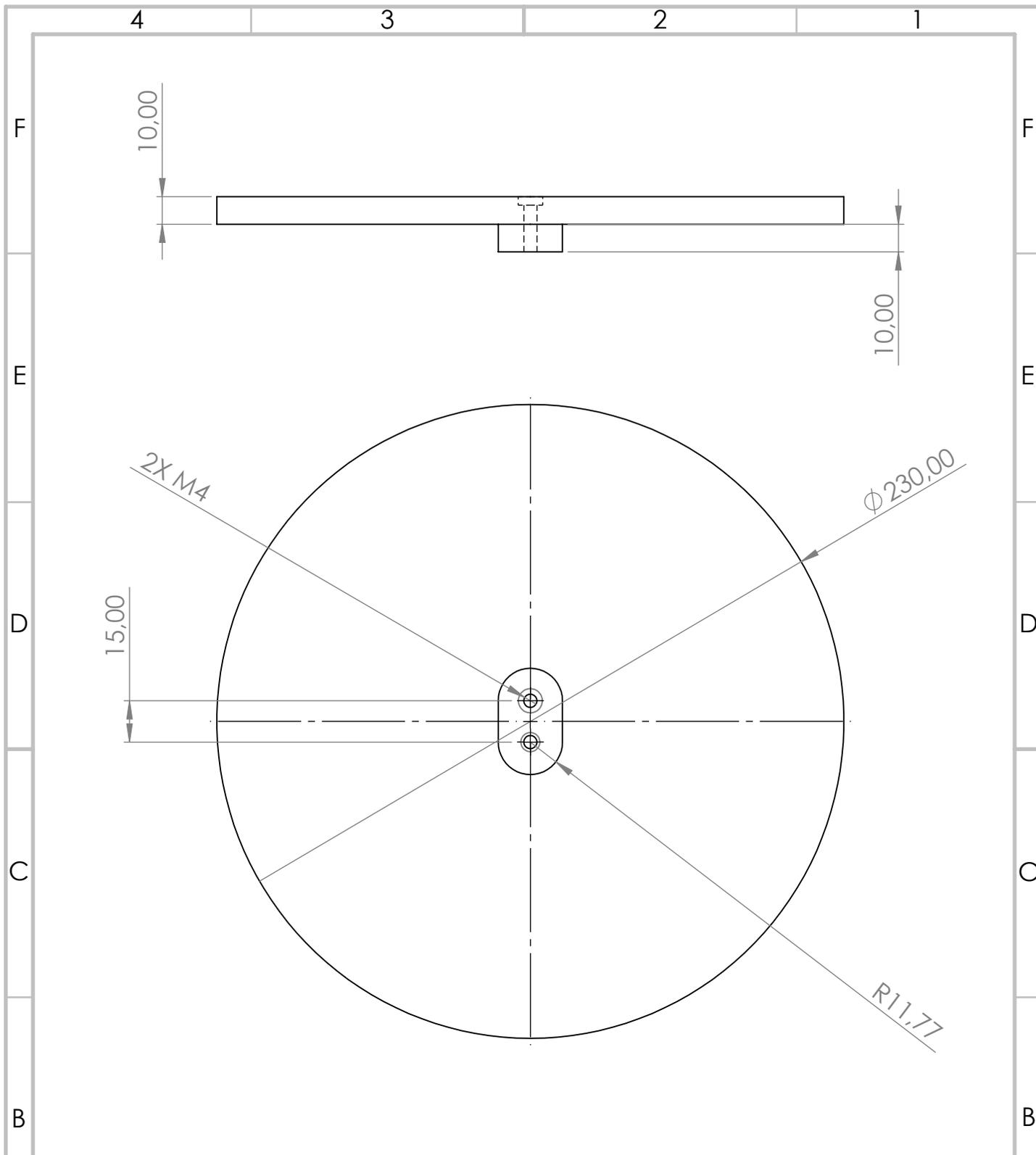
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL: INDICADO	DESIGNACIÓN		
DIBUJ.	J. CUBERO		6/10/2024		Acople de válvula		
VERIF.				MATERIAL: Acero inoxidable AISI 304			
APROB.							
FABR.							
SISTEMA:	TOLERANCIAS:		TOLERANCIA EN:	PROYECTO:	ESCALA:	FORMATO	
	LINEAL: X ±1 .X ±0.1 .XX ±0.05 .XXX ±0.01 ANGULAR: ±0.5°		mm	DESIGNO DE SISTEMA DE LLENADO DE DULCE DE LECHE	1:2	CARTA	
	PESO:	UNIDADES:	gramos	mm	HOJA 1 DE 6		

4

3

2

1



**TEC** | Tecnológico de Costa Rica

ESCUELA DE INGENIERIA MECATRÓNICA

REVISIÓN:

CURSO:  
PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN

**G3**

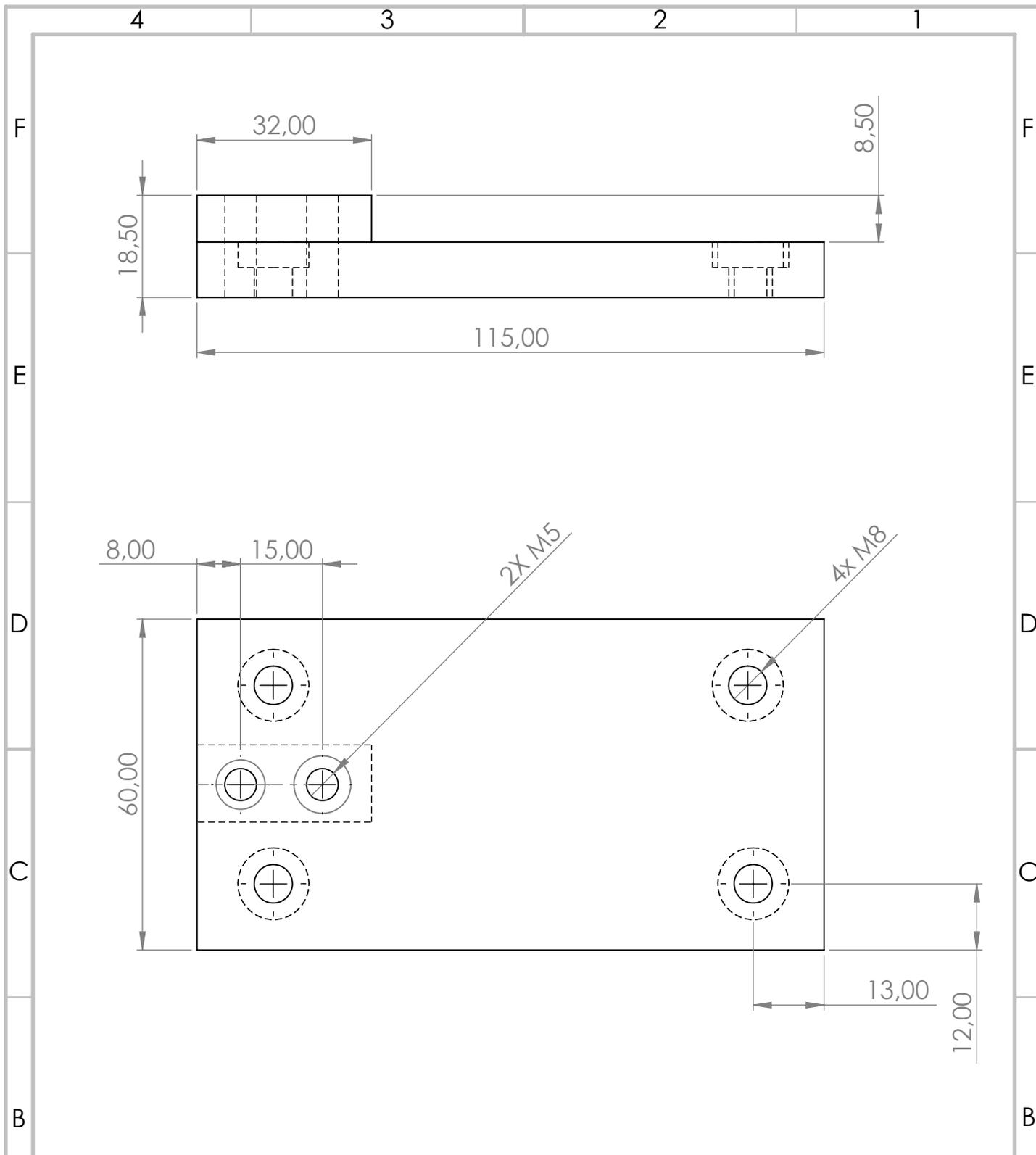
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL: INDICADO	DESIGNACIÓN
DIBUJ.	J. CUBERO		6/10/2024		Base superior para celda de carga
VERIF.				MATERIAL:	
APROB.				Acero inoxidable AISI 304	
FABR.					
SISTEMA:	TOLERANCIAS:		TOLERANCIA EN:	PROYECTO:	ESCALA:
	LINEAL: X ±1 .X ±0.1 .XX ±0.05 .XXX ±0.01 ANGULAR: ±0.5°		mm	DESIGNO DE SISTEMA DE LLENADO DE DULCE DE LECHE	1:2
	PESO:	UNIDADES:	gramos	mm	FORMATO
					CARTA
					HOJA 2 DE 6

4

3

2

1



**TEC** | Tecnológico de Costa Rica

ESCUELA DE INGENIERIA MECATRÓNICA

REVISIÓN:

CURSO:  
PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN

**G3**

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL: INDICADO	DESIGNACIÓN
DIBUJ.	J. CUBERO		6/10/2024		Base inferior para celda de carga
VERIF.				MATERIAL: Acero inoxidable AISI 304	
APROB.				TOLERANCIA EN: mm	
FABR.				PESO: gramos	
SISTEMA:	TOLERANCIAS: LINEAL: X ±1 .X ±0.1 .XX ±0.05 .XXX ±0.01 ANGULAR: ±0.5°			TOLERANCIA EN: mm	PROYECTO: DISEÑO DE SISTEMA DE LLENADO DE DULCE DE LECHE
PRIMER CUADRANTE					ESCALA: <b>1:1</b>
					FORMATO CARTA
					UNIDADES: mm
					HOJA 3 DE 6

4

3

2

1



4

3

2

1

F

F

E

E

D

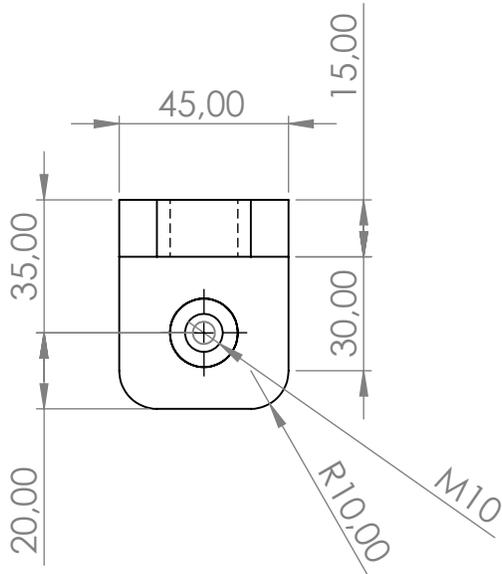
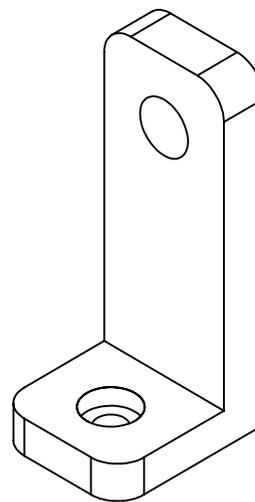
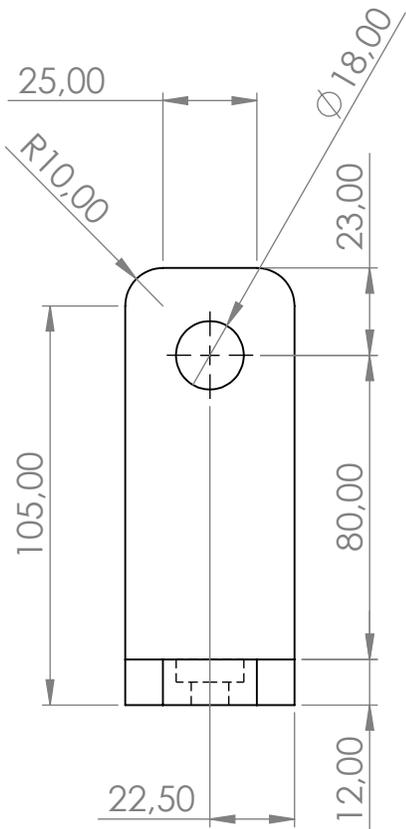
D

C

C

B

B



**TEC** | Tecnológico de Costa Rica

ESCUELA DE INGENIERIA MECATRÓNICA

REVISIÓN:

CURSO:  
PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN

**G3**

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL: INDICADO
DIBUJ.	J. CUBERO		6/10/2024	
VERIF.				MATERIAL: Plástico ABS
APROB.				
FABR.				

DESIGNACIÓN  
Soporte para sensor de proximidad

SISTEMA:	TOLERANCIAS:
	LINEAL: X ±1 .X ±0.1 .XX ±0.05 .XXX ±0.01 ANGULAR: ±0.5°

TOLERANCIA EN:	PROYECTO:
mm	DESIGNO DE SISTEMA DE LLENADO DE DULCE DE LECHE
PESO:	UNIDADES:
gramos	mm

ESCALA:	FORMATO
1:2	CARTA
HOJA 5 DE 6	

4

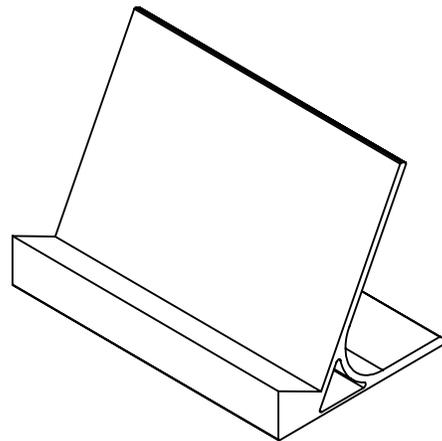
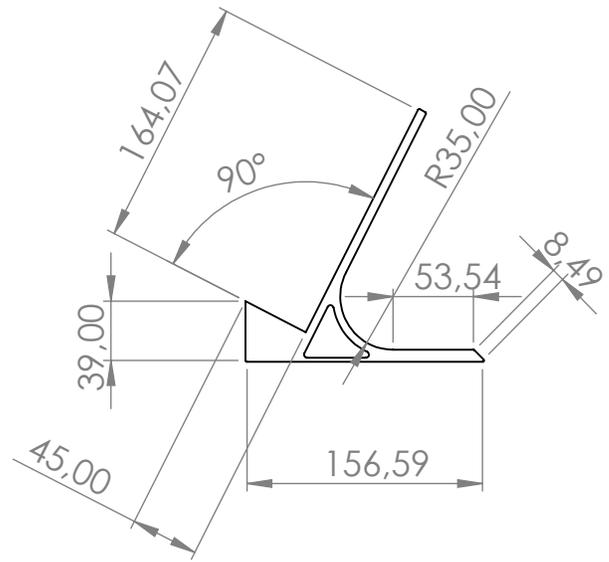
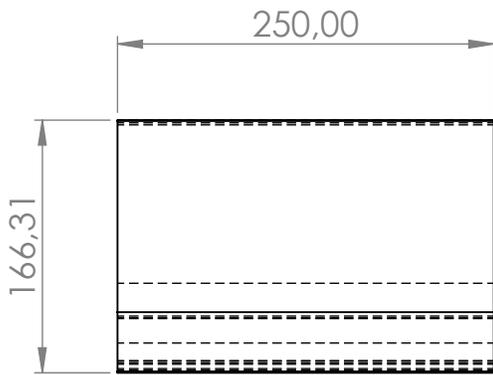
3

2

1

A

A



**TEC** | Tecnológico de Costa Rica

ESCUELA DE INGENIERIA MECATRÓNICA

REVISIÓN:

CURSO:  
PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN

**G3**

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL: INDICADO	DESIGNACIÓN		
DIBUJ.	J. CUBERO		6/10/2024	MATERIAL: Plástico ABS	Soporte para HMI		
VERIF.							
APROB.							
FABR.							
SISTEMA:	TOLERANCIAS:		TOLERANCIA EN:	PROYECTO:	ESCALA:	FORMATO	
	LINEAL: X ±1 .X ±0.1 .XX ±0.05 .XXX ±0.01 ANGULAR: ±0.5°		mm	DISÑO DE SISTEMA DE LLENADO DE DULCE DE LECHE	1:5	CARTA	
	PESO:	UNIDADES:	gramos	mm	HOJA 6 DE 6		

4

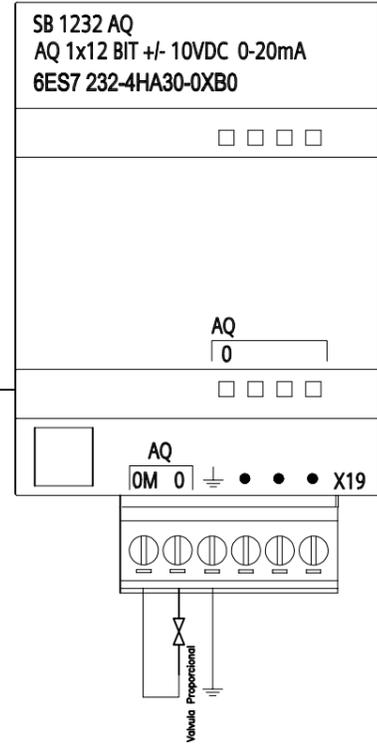
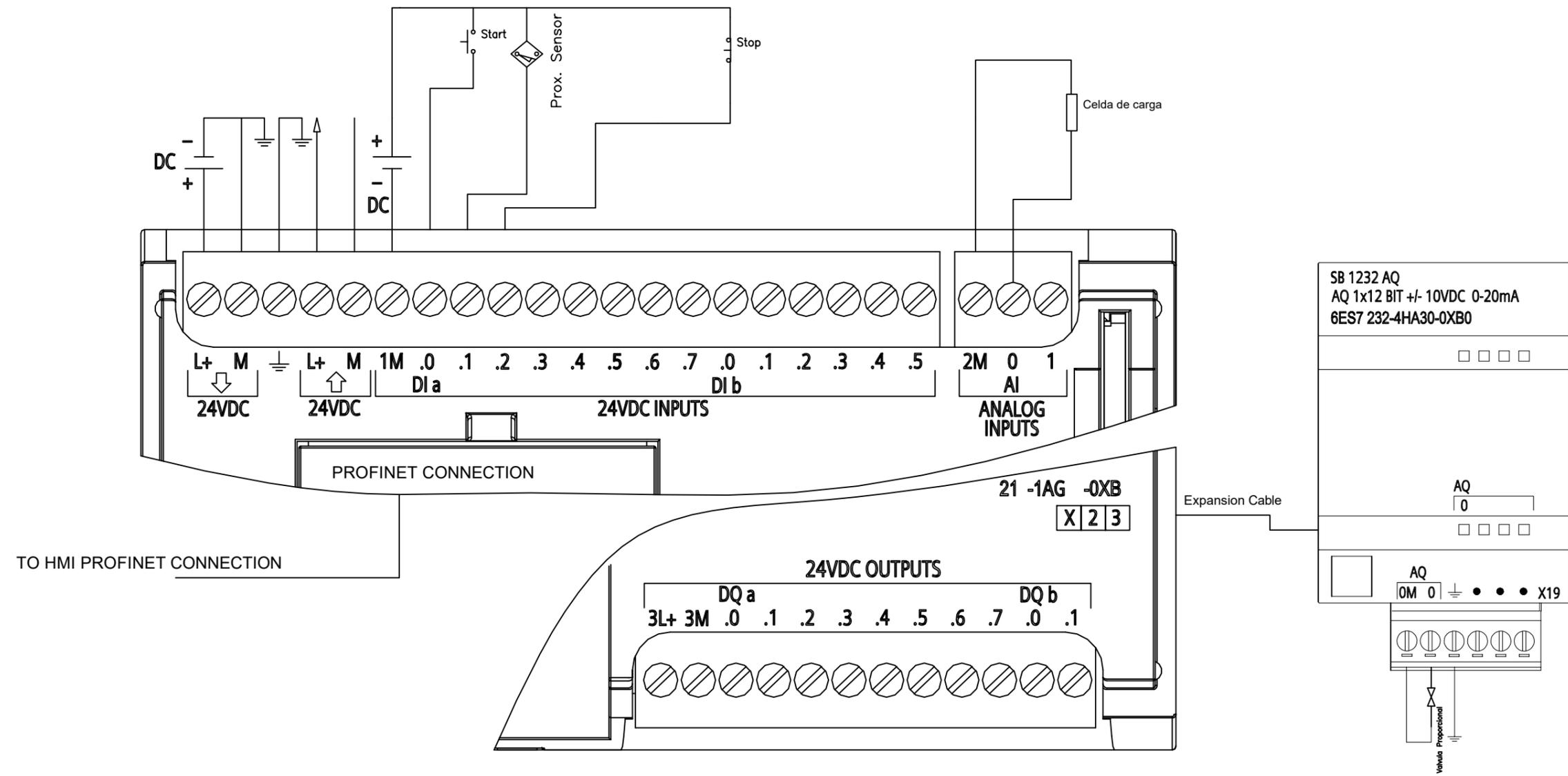
3

2

1

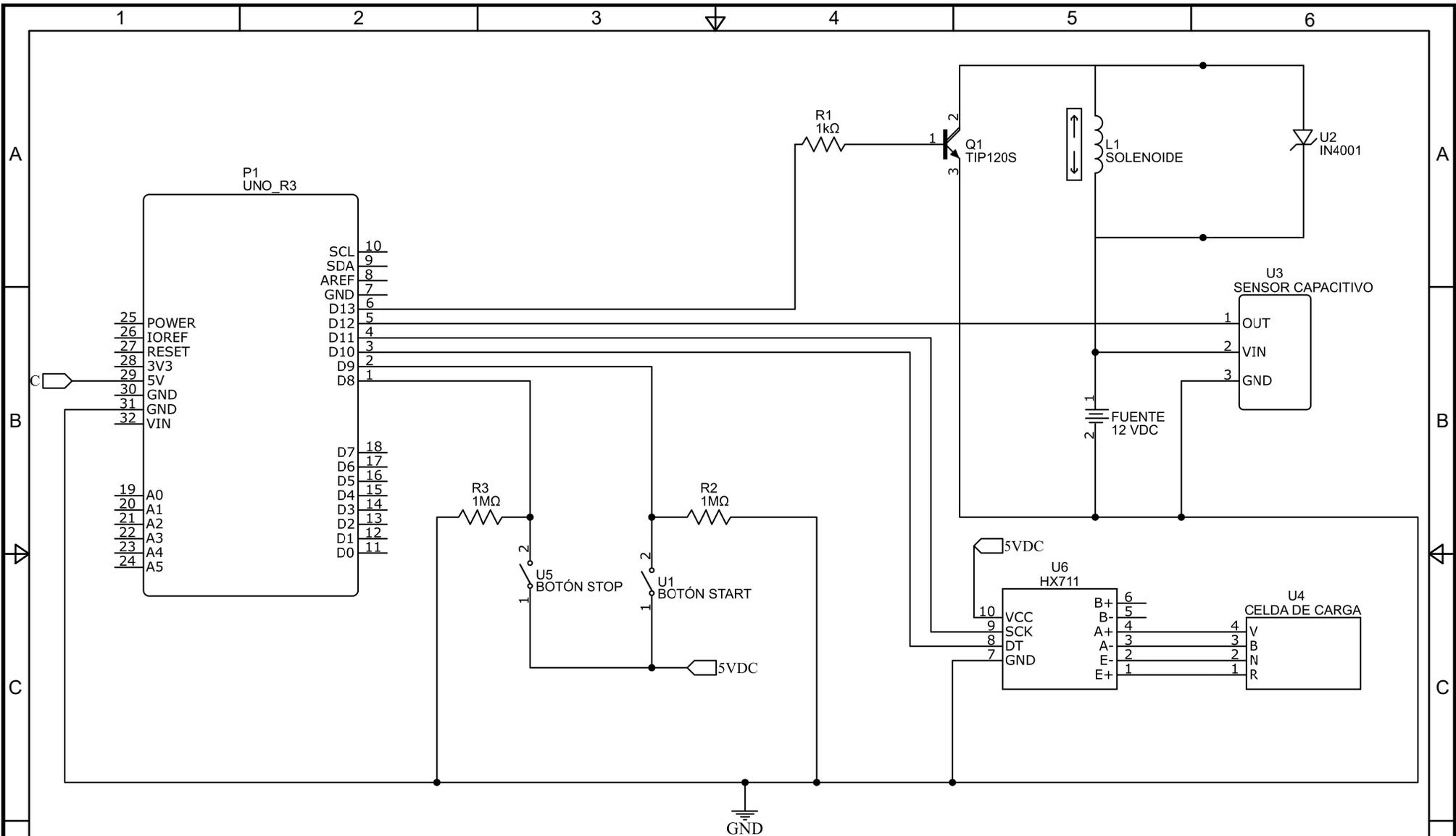
Revision

-	-	-	-	-
---	---	---	---	---



TO HMI PROFINET CONNECTION

	INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA				
	PROYECTO FINAL DE GRADUACION				
	PLANO ELÉCTRICO PLC				
DIBUJO:	J.CUBERO	SIZE	FSCM NO	DRAWING NUMBER	REV
		A3	-	1	-
		SCALE	-	SHEET	1/1



<b>TEC</b> INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA ESCUELA DE INGENIERIA MECATRÓNICA	ESCALA: -	ACOTACIÓN: mm
	DISEÑO: J. CUBERO	
	DIBUJO: J. CUBERO	
	SUPERVISO: -	
PARTE: ESQUEMÁTICO DE CONEXIÓN DE PRUEBA DE CONCEPTO	SISTEMA	LÁMINA
PROYECTO: TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN		1 / 1

PRODUCED BY AN AUTODESK STUDENT VERSION

PRODUCED BY AN AUTODESK STUDENT VERSION