

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Mecatrónica




**Diseño e implementación de un sistema automatizado de dosificación de aditivo anticoagulante para reducir obstrucciones y controlar la viscosidad de la goma en la fabricación de cartón corrugado.**

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


Yeinier Steven Elizondo Benett

Cartago, 2 de diciembre del 2025

Diseño e implementación de un sistema automatizado de dosificación de aditivo anticoagulante para reducir obstrucciones y controlar la viscosidad de la goma en la fabricación de cartón corrugado. © 2025 by Yeinier Steven Elizondo Benett is licensed under CC BY-NC 4.0 

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.



Yeinier Steven Elizondo Benett

Cartago, 2 de diciembre del 2025

Céd: 7-0276-0722

**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(a) en Mecatrónica, con el grado académico de Licenciatura.

Estudiante: Yeinier Steven Elizondo Benett

Proyecto: Diseño e implementación de un sistema automatizado de dosificación de aditivo anticoagulante para reducir obstrucciones y controlar la viscosidad de la goma en la fabricación de cartón corrugado.

IVAN ARAYA  
MENESES (FIRMA)

Firmado digitalmente por IVAN  
ARAYA MENESES (FIRMA)  
Fecha: 2025.12.02 21:04:00  
-06'00'

---

MSc. -Ing. Iván Araya Meneses

Asesor

Cartago, 2 de diciembre del 2025

**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: Yeinier Steven Elizondo Benett

Proyecto: Diseño e implementación de un sistema automatizado de dosificación de aditivo anticoagulante para reducir obstrucciones y controlar la viscosidad de la goma en la fabricación de cartón corrugado.

**Miembros del jurado evaluador**



**ANA GABRIELA ORTIZ LEON (FIRMA)**  
PERSONA FISICA, CPF-01-0775-0599.  
Fecha declarada: 02/12/2025 07:24 PM

---

Dra. -Ing. Gabriela Ortiz León

Jurado

**DIEGO HUMBERTO ELIZONDO RAMIREZ (FIRMA)**  
Digitally signed by DIEGO HUMBERTO ELIZONDO RAMIREZ (FIRMA)  
Date: 2025.12.02 16:43:49 -06'00'

---

Ing. Diego Humberto Elizondo Ramírez

Jurado

**VIVIANA MARIA ACEBEY ARANA (FIRMA)**  
Firmado digitalmente por VIVIANA MARIA ACEBEY ARANA (FIRMA)  
Fecha: 2025.12.02 17:26:13 -06'00'

---

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, 2 de diciembre del 2025

# Resumen

En la planta de cartón corrugado de la Corporación de Desarrollo Agrícola Del Monte, la formulación de la goma utilizada para el pegado del cartón requiere la incorporación de diversos aditivos, cuya dosificación precisa es fundamental para asegurar la calidad del producto final, la seguridad del operador y la eficiencia operativa. Actualmente, la dosificación de estos aditivos se realiza de forma manual, lo que incrementa los riesgos de exposición a productos químicos, el desperdicio de materia prima y la variabilidad en la calidad del producto. Frente a esta problemática, el objetivo de este proyecto es diseñar e implementar un sistema automatizado de dosificación para un aditivo anticoagulante corrosivo, permitiendo así una operación segura y trazable sin intervención directa del operador. Para el desarrollo del proyecto se empleó la metodología de diseño de productos de Ulrich y Eppinger, que abarca desde la identificación de necesidades hasta la validación de la solución propuesta. Se realizó un análisis del sistema actual y se recopilaron los requerimientos técnicos y operativos mediante entrevistas y observación directa. A partir de esta información, se generaron alternativas conceptuales que fueron evaluadas según criterios de precisión, facilidad de implementación, escalabilidad, mantenimiento y confiabilidad. Una vez definido el diseño, se procedió a su implementación. Las pruebas de validación incluyeron métricas de precisión de dosificación, homogeneidad y trazabilidad de los ciclos operativos. Los resultados obtenidos demuestran que el sistema automatizado reduce el margen de error humano, es económicamente viable y representa una mejora sustancial respecto al método manual de dosificación.

**Palabras clave:** Dosificación automática, Sistema mecatrónico, Aditivos para goma, Control industrial, PLC, Seguridad industrial, Trazabilidad.

# Abstract

At the Corporación de Desarrollo Agrícola Del Monte corrugated cardboard plant, glue for cardboard bonding is formulated onsite, requiring the incorporation of various additives. Precise and controlled dosing of these additives is essential to ensure product quality, operator safety, and operational efficiency. Currently, additives are dispensed manually, which increases the risks of chemical exposure, waste of raw materials, and inconsistencies in product quality. To address these challenges, this project aims to design and implement an automated dosing system for a corrosive anticoagulant additive, enabling safe, traceable, and operator-free operation. The Ulrich and Eppinger product design methodology was employed, encompassing needs assessment through to solution validation. The current system was analyzed, and technical and operational requirements were identified through interviews and direct observation. Based on this information, conceptual alternatives were generated and evaluated in terms of dosing accuracy, ease of implementation, scalability, maintainability, and reliability. After selecting the optimal design, the system was implemented and validated through tests measuring dosing accuracy, homogeneity, and operational cycle traceability. The results indicate that the automated system reduces human error, is economically viable, and offers substantial improvements over manual dosing.

**Keywords:** Automatic dosing, Mechatronic system, Glue additives, Industrial control, PLC, Industrial safety, Traceability

*La leyenda del pez koi y su viaje por la cascada es un recordatorio de que incluso los caminos más difíciles pueden estar llenos de sueños, coraje y amor*

# Agradecimientos

Deseo expresar mi más profundo agradecimiento a mi esposa, por ser siempre mi mano derecha en cada proyecto que he emprendido desde que tengo el honor de conocerla. Sin su invaluable amor y apoyo, este logro no habría sido posible.

A mi madre, por cada momento compartido bajo aquel árbol de manzana, donde me enseñó mis primeros pasos hacia el cumplimiento de mis sueños. Gracias por su amor incondicional, su dedicación, las largas noches, las lágrimas y hasta los regaños, pues sin ellos no estaría hoy aquí.

Finalmente, agradezco a todas las personas que a lo largo de los años confiaron en mí, y a quienes me tendieron una mano amiga en los momentos en que más lo necesité.

Yeinier Steven Elizondo Benett

Cartago, 2 de diciembre del 2025

# Índice general

<b>Lista de figuras</b>	<b>vii</b>
<b>Lista de tablas</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de abreviaciones</b>	<b>x</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Contexto . . . . .	1
1.2 Descripción del problema . . . . .	2
1.3 Síntesis del problema . . . . .	3
1.4 Objetivos . . . . .	3
1.4.1 Objetivo General . . . . .	3
1.4.2 Objetivo Específico . . . . .	3
1.5 Estructura del documento . . . . .	4
<b>2 Marco Teórico</b>	<b>5</b>
2.1 Procesos industriales de formulación de goma . . . . .	5
2.1.1 Propiedades relevantes . . . . .	6
2.1.2 Importancia de los aditivos en el desempeño de la formulación . . . . .	7
2.2 Dosificación de aditivos en procesos industriales . . . . .	8
2.2.1 Métodos manuales vs. métodos automatizados . . . . .	8
2.3 Instrumentación y sensores aplicables . . . . .	9
2.3.1 Sensores de nivel . . . . .	9
2.3.2 Sensores de flujo . . . . .	10
2.3.3 Sensores de presión . . . . .	11
2.3.4 Sensores de temperatura . . . . .	11

---

2.4	Actuadores industriales y mecanismos de control de flujo . . . . .	12
2.4.1	Tipos de válvulas . . . . .	12
2.4.2	Bombas dosificadoras . . . . .	13
2.5	Materiales industriales para componentes en contacto con aditivos . . . . .	14
2.5.1	Acero inoxidable . . . . .	14
2.5.2	PVC (Cloruro de Polivinilo) . . . . .	15
2.5.3	Polietileno (PE) . . . . .	15
2.5.4	PTFE (Politetrafluoroetileno) . . . . .	15
2.6	Controladores industriales . . . . .	16
2.6.1	PLC (Controladores Lógicos Programables) . . . . .	16
2.6.2	Alternativas: Relés cableados y microcontroladores . . . . .	16
2.7	Automatización industrial . . . . .	17
2.7.1	Arquitectura de sistemas automatizados . . . . .	17
2.7.2	Entradas/salidas discretas y analógicas . . . . .	17
2.7.3	Integración entre sensores, actuadores y controladores . . . . .	17
2.7.4	Interfaces hombre-máquina básicas . . . . .	18
2.8	Seguridad e higiene en procesos industriales . . . . .	18
2.8.1	Protección del operador ante productos corrosivos . . . . .	18
2.8.2	Seguridad eléctrica y neumática . . . . .	18
<b>3</b>	<b>Metodología</b>	<b>19</b>
3.1	Identificación de necesidades del cliente . . . . .	20
3.1.1	Ideas clave obtenidas de la entrevista . . . . .	20
3.1.2	Transformación y jerarquización de las necesidades del cliente . . . . .	23
3.2	Especificaciones del producto . . . . .	25
3.2.1	Métricas . . . . .	25
3.2.2	Obtención de las métricas . . . . .	27
3.2.3	Valores marginales e ideales . . . . .	28
3.3	Generación de conceptos . . . . .	29
3.3.1	Descomposición funcional del problema . . . . .	29
3.3.2	Proceso de búsqueda interna de conceptos . . . . .	31
3.3.3	Búsqueda externa de conceptos . . . . .	36

3.3.4	Construcción de conceptos . . . . .	38
3.4	Selección de conceptos . . . . .	40
3.4.1	Filtrado de conceptos. . . . .	40
3.4.2	Selección del concepto a seguir . . . . .	42
3.5	Pruebas de validación de conceptos . . . . .	44
3.5.1	Prueba 1: Evaluación del sistema de activación y precisión de dosificación de aditivo. . . . .	45
3.5.2	Prueba 2: Validación de admisión de goma en integración con sistema de control . . . . .	46
3.5.3	Prueba 2B: Verificación de compatibilidad física y funcional de admisión de goma con el sistema automatizado. . . . .	46
3.5.4	Prueba 3: Validación del subsistema de control . . . . .	47
3.6	Determinación del tamaño de muestra para estimar el coeficiente de variación. . . . .	48
3.6.1	Fundamento teórico. . . . .	48
3.7	Determinación del tamaño de muestra para la estimación del promedio de volumen y tiempo de descarga. . . . .	50
3.7.1	Fundamento teórico. . . . .	50
3.7.2	Sustitución de valores. . . . .	50
3.7.3	Interpretación. . . . .	51
<b>4</b>	<b>Propuesta de diseño</b> . . . . .	<b>52</b>
4.1	Diagnóstico del proceso actual . . . . .	52
4.1.1	Método actual de aplicación del aditivo . . . . .	52
4.1.2	Estructura actual del sistema de distribución de goma . . . . .	56
4.1.3	Medidas de viscosidad (histórico) . . . . .	58
4.2	Selección de componentes . . . . .	60
4.2.1	Selección de materiales . . . . .	60
4.2.2	Tubería . . . . .	63
4.2.3	Bomba . . . . .	64
4.2.4	Forma del tanque de aditivo . . . . .	65
4.2.5	Válvulas . . . . .	67
4.2.6	Sensores de nivel . . . . .	68

---

4.2.7	Selección del PLC y elementos de control . . . . .	69
4.3	Dimensionamiento de la bomba. . . . .	71
4.3.1	Determinación de la viscosidad cinemática del aditivo. . . . .	71
4.3.2	Condiciones de operación esperadas. . . . .	72
4.4	Diseño del contenedor de aditivo. . . . .	77
4.4.1	Diseño CAD y especificaciones. . . . .	77
4.5	Integración a la línea de producción. . . . .	80
4.5.1	Diagrama general de integración física. . . . .	80
4.5.2	Compatibilidad con operación actual. . . . .	83
4.6	Diseño de la lógica de control (PLC). . . . .	84
4.6.1	Diagrama de flujo funcional. . . . .	84
4.6.2	Representación en Ladder. . . . .	85
4.7	Conexiones eléctricas. . . . .	89
4.7.1	Conexión eléctrica y lógica del sistema. . . . .	89
<b>5</b>	<b>Resultados y Análisis.</b>	<b>92</b>
5.1	Metodología de validación. . . . .	92
5.1.1	Condiciones generales de las validaciones. . . . .	92
5.1.2	Instrumentos y procedimiento de medición. . . . .	93
5.1.3	Preparación y calibración previa . . . . .	93
5.1.4	Ejecución y supervisión de las pruebas. . . . .	93
5.1.5	Criterios de validación. . . . .	94
5.2	Prueba 1: Evaluación del sistema de activación y precisión de dosificación de aditivo . . . . .	94
5.2.1	Objetivo de la prueba. . . . .	94
5.2.2	Descripción de la prueba . . . . .	94
5.2.3	Resultados experimentales. . . . .	95
5.2.4	Representación gráfica de resultados . . . . .	95
5.2.5	Análisis estadístico de la precisión de dosificación. . . . .	96
5.2.6	Análisis e interpretación de resultados. . . . .	96
5.3	Prueba 2: Validación de la admisión de goma en integración con el sistema de control. . . . .	97

5.3.1	Objetivo de la prueba . . . . .	97
5.3.2	Descripción de la prueba. . . . .	97
5.3.3	Resultados experimentales . . . . .	97
5.3.4	Análisis de integración y comportamiento. . . . .	98
5.3.5	Conclusiones de la validación . . . . .	98
5.3.6	Prueba 2B: Verificación de compatibilidad física y funcional de admisión de goma . . . . .	99
5.4	Prueba 3: Validación del subsistema de control . . . . .	101
5.4.1	Objetivo de la prueba . . . . .	101
5.4.2	Descripción de la prueba. . . . .	102
5.4.3	Resultados experimentales . . . . .	102
5.4.4	Análisis del funcionamiento del control. . . . .	106
5.4.5	Conclusiones de la validación. . . . .	106
5.5	Análisis global de los resultados y cumplimiento de los objetivos. . . . .	107
5.5.1	Síntesis de resultados por subsistema. . . . .	107
5.5.2	Evaluación del cumplimiento de objetivos y métricas. . . . .	108
5.5.3	Análisis integral del desempeño. . . . .	110
5.5.4	Conclusiones del análisis global. . . . .	110
5.6	Evaluación estadística de la mejora de la viscosidad. . . . .	110
5.6.1	Objetivo. . . . .	110
5.6.2	Fundamento estadístico. . . . .	111
5.6.3	Metodología aplicada. . . . .	111
5.6.4	Resultados descriptivos. . . . .	112
5.6.5	Pruebas de hipótesis. . . . .	112
5.6.6	Conclusiones. . . . .	113
5.7	Análisis financiero. . . . .	113
5.7.1	Inversión inicial (CapEx). . . . .	113
5.7.2	Beneficios económicos. . . . .	114
5.7.3	Evaluación financiera. . . . .	114
5.7.4	Análisis e interpretación. . . . .	115

---

6.1 Conclusiones. . . . .	116
6.2 Recomendaciones. . . . .	117
<b>A Planos mecánicos</b>	<b>127</b>
<b>B Planos Eléctricos</b>	<b>135</b>
<b>C Repositorio digital de manuales, planos y resultados del sistema</b>	<b>139</b>

# Índice de figuras

3.1	Descomposición general del problema. . . . .	30
3.2	Descomposición funcional detallada del problema. . . . .	30
4.1	Recipiente utilizado para la dosificación del aditivo. Fuente: Elaboración propia.	53
4.2	Descarga del aditivo en la línea de mezcla. Fuente: Elaboración propia. . . . .	54
4.3	Obstrucción parcial en tubería por coagulación de goma. Fuente: Elaboración propia. . . . .	55
4.4	Posición de la válvula en la tanqueta de aditivo. Fuente: Elaboración propia.	55
4.5	Tanque de muestreo. Fuente: Elaboración propia. . . . .	58
4.6	Evolución de la viscosidad medida vs. rango aceptable. Fuente: Elaboración propia. . . . .	60
4.7	Cuerpo de almacenamiento de aditivo. Fuente: Elaboración propia. . . . .	78
4.8	Tapa superior. Fuente: Elaboración propia. . . . .	78
4.9	Tapa superior con accesorios. Fuente: Elaboración propia. . . . .	79
4.10	Visor de nivel. Fuente: Elaboración propia. . . . .	79
4.11	Ensamble general. Fuente: Elaboración propia. . . . .	80
4.12	Esquema original del tanque dosificador de goma. Fuente: Elaboración propia.	81
4.13	Esquema del tanque dosificador de goma, con control de aditivo. Fuente: Elaboración propia. . . . .	82
4.14	Diagrama de flujo de solución propuesta. Fuente: Elaboración propia. . . . .	86
4.15	Diagrama Ladder implementado en el PLC Micro820, con modos de operación manual y automático. Fuente: Elaboración propia. . . . .	88
5.1	Variación del volumen dosificado y del tiempo de descarga durante 100 ciclos de prueba. . . . .	95

---

5.2	Secuencia de inicio. Fuente: Elaboración propia. . . . .	103
5.3	Enable activado. Fuente: Elaboración propia. . . . .	104
5.4	Función de llenado de tanque de aditivo. Fuente: Elaboración propia. . . . .	104
5.5	Función de llenado de tanque de goma. Fuente: Elaboración propia. . . . .	105
5.6	Descarga de aditivo. Fuente: Elaboración propia. . . . .	105
5.7	Rellenado de tanque de aditivo. Fuente: Elaboración propia. . . . .	106

# Índice de tablas

3.1	Transformación de ideas a necesidades del cliente. . . . .	23
3.2	Métricas a evaluar y sus unidades de medida. . . . .	25
3.3	Valores marginales e ideales definidos para las métricas. . . . .	29
3.4	Posibles soluciones de subproblemas para la formulación de conceptos. . . . .	38
3.5	Combinaciones propuestas para cada subproblema. . . . .	39
3.6	Matriz de filtrado de conceptos. . . . .	41
3.7	Matriz de evaluación de conceptos . . . . .	44
4.1	Mediciones de tiempo de vaciado y viscosidad cinemática calculada del aditivo con copa Zahn #2. . . . .	72
5.1	Resumen estadístico de los resultados de la Prueba 1. . . . .	95
5.2	Resumen de observaciones durante la validación de admisión de goma. . . . .	98
5.3	Resultados de verificación de compatibilidad física y funcional. . . . .	100
5.4	Resultados de la validación del subsistema de control. . . . .	103
5.5	Evaluación del cumplimiento de las métricas del sistema dosificador automatizado. . . . .	109
5.6	Resumen estadístico de la viscosidad antes y después de la automatización. . . . .	112
5.7	Detalle de inversión inicial del sistema dosificador. . . . .	113
5.8	Indicadores financieros del sistema dosificador (12 meses). . . . .	115

# Lista de abreviaciones

<b>Abreviación</b>	<b>Significado completo</b>
PLC	Controlador Lógico Programable (Programmable Logic Controller)
AC	Aire Comprimido
HMI	Interfaz Hombre-Máquina (Human-Machine Interface)
I/O	Entradas/Salidas
PTFE	Politetrafluoroetileno
PVC	Policloruro de vinilo
AISI	American Iron and Steel Institute
EPP	Equipo de Protección Personal
ISO	International Organization for Standardization
AIC	Automatic Intelligent Control (Control Inteligente Automático)
RTD	Resistance Temperature Detector (Detector de Temperatura por Resistencia)

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 Contexto

La Corporación de Desarrollo Agrícola del Monte, S.A., conocida comercialmente como Fresh Del Monte, es una empresa multinacional con operaciones en más de 20 países. Desde 1968, ha establecido una presencia significativa en Costa Rica, consolidándose como líder en la producción y exportación de frutas frescas al norte global.[1]

En Costa Rica, la compañía opera diversas instalaciones, entre ellas la División de Empaques ubicada en Barrio Envaco, Limón. Esta planta industrial se especializa en la fabricación de cartón y cajas de cartón corrugado, elementos esenciales para el transporte y exportación de frutas, ya que garantizan que los productos lleguen en óptimas condiciones a su destino final. En 2020, la producción de papel y cartón en Costa Rica superó las 250 000 toneladas, lo que representó el 37% de la producción total latinoamericana de ese año. Esta industria aportó al país un 3,3% del valor bruto de la producción del sector manufacturero en 2019 .[2]

El presente proyecto se desarrolló en la denominada “Cocina de goma”, área del departamento de producción responsable de la preparación de la goma utilizada en la fabricación de cartón. La intervención será ejecutada por el departamento de mantenimiento.

Actualmente, la empresa enfrenta un desafío relacionado con la adición manual de un aditivo necesario para la goma, tarea realizada por un operario. La dosificación ineficiente ha incrementado los costos operativos de la planta debido al aumento de tiempos muertos y la

pérdida de materia prima por cartón despegado. Por este motivo, se propone la ejecución de este proyecto, cuyo objetivo es optimizar la dosificación de aditivos mediante una aplicación precisa y controlada.

El proyecto responde a una necesidad operativa identificada y busca implementar una solución técnica que genere resultados medibles a corto y mediano plazo, contribuyendo a la sostenibilidad económica y operativa de la planta.

## 1.2 Descripción del problema

En la cocina de goma, uno de los pasos críticos en el proceso de formulación del adhesivo es la aplicación del aditivo anticoagulante y realzador de características. Este componente tiene como objetivo mejorar la penetración de la goma en el papel y aumentar su fluidez, lo que reduce el tiempo de secado y previene incrustaciones en la tubería. Actualmente, la dosificación del aditivo se realiza manualmente por un operador, sin control automático vinculado a la operación.

Esta acción se ejecuta cada vez que el dosificador, es decir, el tanque de goma que incorpora nuevos lotes, recibe una nueva carga para reponer la consumida por el sistema. Aunque un exceso de aditivo puede disminuir la viscosidad de la goma, los casos más frecuentes en la planta se deben a la omisión en la aplicación del aditivo, lo que incrementa la viscosidad, reduce el flujo en las paredes y provoca el secado, generando acumulación progresiva de residuos sólidos en las tuberías de la línea de distribución.

Se han registrado eventos en los que, debido a fallas en la aplicación del aditivo, ha sido necesario desarmar completamente la línea de distribución para su limpieza, ya que la coagulación ha causado incrustaciones, pérdida de presión y obstrucciones internas. Estas intervenciones han requerido tiempo adicional y han provocado la pérdida de materia prima. Por lo tanto, es fundamental desarrollar una estrategia técnica más precisa.

## 1.3 Síntesis del problema

Existe la necesidad de implementar un sistema de dosificación automático del aditivo anti-coagulante que permita aplicar la cantidad requerida de forma precisa durante cada recarga del tanque dosificador, eliminando la intervención manual del operador. La dosificación actual expone el proceso a errores humanos que generan obstrucciones en las tuberías y variaciones en los valores de viscosidad, lo que incrementa la frecuencia de mantenimientos. Por tanto, se requiere una solución que mejore la confiabilidad operativa sin comprometer la estructura actual y garantice la calidad del producto final.

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo General

Desarrollar un sistema automatizado para la dosificación de aditivo anticoagulante para la línea de distribución de goma en la “cocina de gomas”, para la fabricación de cartón corrugado de la División de Empaques de la Corporación de Desarrollo Agrícola Del Monte, con el fin de mitigar los riesgos de obstrucción en las líneas de distribución y controlar la viscosidad de la mezcla.

### 1.4.2 Objetivo Específico

1. Describir ampliamente las características del sistema de distribución de goma actual y el efecto de la dosificación sobre las características de la goma para establecer los requerimientos óptimos de diseño.
2. Diseñar un sistema de bombeo para la manipulación y aplicación del aditivo anticoagulante.
3. Desarrollar un sistema automático para la aplicación de aditivo en la formulación de goma.
4. Validar la mejora tras la implementación del sistema de dosificación de aditivo con respecto al estado inicial del sistema.

## 1.5 Estructura del documento

A continuación, se describen los apartados centrales que conforman el proyecto. En la introducción (capítulo 1) se expone el contexto general de la empresa, la relevancia de la industria, el problema identificado y los objetivos del proyecto. El capítulo 2 desarrolla el marco teórico, presentando la información relevante que sustenta el proyecto a través de una revisión de la literatura.

El capítulo 3 describe la metodología empleada para la ejecución del proyecto, así como el procedimiento para alcanzar la solución al problema planteado y la propuesta de validación. El capítulo 4 presenta la propuesta de diseño, que incluye el desarrollo de la solución y justifica la propuesta en función de los objetivos establecidos.

El capítulo 5 expone los resultados y su análisis, incluyendo los datos obtenidos de las pruebas de validación de la solución y un análisis económico que evalúa la viabilidad financiera de la implementación. Posteriormente, el capítulo 6 presenta las conclusiones y recomendaciones, resumiendo los resultados previos y ofreciendo sugerencias para la futura implementación, mantenimiento y posibles mejoras del sistema.

La bibliografía reúne las referencias consultadas para respaldar el presente documento. El apartado final, apéndices y anexos, incluye fichas técnicas y planos que facilitan la comprensión integral del proyecto.

El principal aporte de ingeniería de este proyecto consiste en el diseño de un sistema automatizado para la dosificación de aditivos en formulaciones de goma, basado en principios de mecatrónica e integración a procesos industriales. Este aporte se manifiesta en dos ejes principales. Primero, se realiza un análisis técnico y funcional que permite determinar la alternativa más adecuada frente a la dosificación manual, considerando criterios como exactitud en la aplicación, compatibilidad con el proceso operativo, simplicidad de mantenimiento y confiabilidad global del sistema. Segundo, se demuestra la factibilidad de la solución mediante su implementación física en condiciones reales de planta, lo que garantiza que el diseño propuesto es confiable y aplicable en el entorno productivo sin interrumpir las actividades de la planta.

# Capítulo 2

## Marco Teórico

El cartón corrugado se compone de dos elementos principales: el médium y el liner. Estos componentes se combinan de diversas maneras para producir diferentes tipos de cartón. El médium, correspondiente al papel corrugado, proporciona la resistencia estructural necesaria para soportar las cargas aplicadas al empaque final. En contraste, el liner es el papel plano que recubre los extremos de la flauta en la lámina corrugada.[3]

### 2.1 Procesos industriales de formulación de goma

La fabricación de cartón corrugado emplea como materias primas el papel (médium y liner) y un adhesivo que los une. El adhesivo consta de dos fases: la Fase 1 o Carrier, que actúa como el componente adhesivo responsable del pegado mediante calor, y la Fase 2 o portadora, que corresponde a la fase acuosa que facilita la penetración entre el papel y el adhesivo.[4]

La formulación básica del adhesivo a base de almidón incluye agua, hidróxido de sodio (NaOH), borato de sodio y almidón, que puede ser de maíz o trigo.[5]

La función de cada ingrediente es la siguiente:

- Almidón: Constituye el componente activo del adhesivo. Es un carbohidrato complejo formado por dos polímeros de glucosa, inodoro e insípido, que se presenta en forma de grano o polvo. Es insoluble en agua fría, pero al calentarse se disuelve, se hincha y gelatiniza, lo que permite su entrelazamiento con las fibras de celulosa del papel.

- Agua: Es el medio a través del cual se transporta el almidón, lo hincha y permite que se gelatinice para formar uniones.
- Soda cáustica (NaOH): El hidróxido de sodio es una sustancia blanca, inodora y soluble en agua, capaz de absorber humedad y CO<sub>2</sub> del aire, lo que la hace corrosiva para metales como el zinc o el aluminio. En la formulación del adhesivo, disminuye el punto gel, incrementa la viscosidad y mejora la capacidad inicial de adhesión (tack). Facilita la hinchazón de los gránulos de almidón y su disolución, incluso a temperatura ambiente. Junto con el bórax, aumenta la viscosidad del adhesivo; sin embargo, un exceso de hidróxido de sodio reduce la viscosidad debido a la fragmentación de las partículas y la gelatinización precipitada.
- Borato de sodio (Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>): El bórax es una sustancia en polvo, blanca, inodora, que presenta una baja toxicidad. En la formulación, su función es amortiguar el efecto de la soda cáustica, impartir viscosidad y pegajosidad y mejorar las propiedades de la película. [6]

### 2.1.1 Propiedades relevantes

#### Punto Gel

El punto gel corresponde a la temperatura en la que los gránulos de almidón, tras absorber agua, se hinchan y comienzan a romperse, liberando las cadenas de polisacáridos que forman una estructura gelatinosa. Este proceso marca el inicio de la gelatinización, fundamental para alcanzar una viscosidad y adhesión efectivas. El punto gel puede modificarse mediante aditivos como la soda cáustica y el bórax, que facilitan la ruptura de las cadenas de almidón y permiten la gelatinización a temperaturas más bajas, aumentando así la eficiencia del proceso.[4]

#### Viscosidad

La viscosidad dinámica o absoluta es una propiedad de los fluidos que describe su resistencia interna al flujo, determinada por la fuerza de las interacciones intermoleculares, lo que limita

el movimiento entre moléculas cercanas. Factores como la temperatura, la concentración de sólidos y los aditivos pueden modificarla .[7]

Por su parte, la viscosidad cinemática ( $v$ ) representa la resistencia interna del fluido al flujo en relación con la gravedad y se calcula como el cociente entre la viscosidad dinámica ( $\mu$ ) y la densidad del fluido ( $\rho$ ), es decir,  $v = \mu/\rho$ . Esta propiedad es esencial en aplicaciones como la dosificación de aditivos, ya que permite caracterizar y comparar materiales, así como predecir el comportamiento laminar o turbulento en los sistemas. [8]

Un método común en la industria para medir la viscosidad cinemática es el viscosímetro de copa, que determina la viscosidad aparente de líquidos midiendo el tiempo que tarda un volumen estándar en fluir por gravedad a través de una boquilla calibrada. En adhesivos, la viscosidad afecta tanto el comportamiento durante la aplicación como la efectividad del pegado. [9]

### **Tixotropía en adhesivos**

La tixotropía es la capacidad de ciertos fluidos no newtonianos para disminuir su viscosidad bajo esfuerzos de corte, como la agitación o el bombeo, y recuperar su estructura original al cesar la aplicación de energía. En la formulación de adhesivos, esta propiedad facilita el control de la aplicación y la estabilidad en reposo; una alta tixotropía previene el escurrimiento, la sedimentación y la evaporación. [10]

## **2.1.2 Importancia de los aditivos en el desempeño de la formulación**

La incorporación de agentes modificadores permite regular la tixotropía en aplicaciones industriales. Los aditivos alteran las propiedades físicas, químicas o mecánicas de los materiales base; en la fabricación de adhesivos, pueden funcionar como plastificantes, estabilizantes, agentes de vulcanización o anticoagulantes, entre otros. Su objetivo principal es optimizar el desempeño del compuesto, regular el flujo del adhesivo, mejorar la estabilidad, asegurar la uniformidad de aplicación y prevenir la sedimentación de sólidos o la gelificación prematura. Además, a nivel de formulación, mejoran la adherencia, la resistencia al desgaste, la

elasticidad y la compatibilidad con diversas superficies.[11]

## 2.2 Dosificación de aditivos en procesos industriales

### 2.2.1 Métodos manuales vs. métodos automatizados

La incorporación de aditivos para mejorar la formulación del adhesivo debe considerar las propiedades reológicas y químicas del aditivo, ya que una dosificación incorrecta puede afectar la homogeneidad de la mezcla, provocar reacciones indeseadas o generar defectos funcionales en el proceso. [12]

La dosificación puede realizarse manualmente, donde los operadores miden y aplican los aditivos a las mezclas. Aunque este método implica un bajo costo inicial, presenta riesgos elevados para la formulación final debido a la variabilidad humana, el riesgo de contaminación cruzada y la posibilidad de errores que afectan la repetibilidad del proceso, como la sobredosificación, la subdosificación o la falta de calibración de los dispositivos de pesaje o volumen [13]. Además, la dosificación manual expone al operario a sustancias químicas, incrementando el riesgo de accidentes laborales y posibles incumplimientos normativos.

Para aumentar la confiabilidad del proceso, pueden implementarse métodos automatizados de dosificación basados en sistemas de control que integran sensores, actuadores y algoritmos para aplicar cantidades precisas de aditivo. Estos sistemas mejoran la precisión y velocidad de la aplicación, permiten la trazabilidad, reducen desperdicios y facilitan el cumplimiento normativo.

Asimismo, los sistemas automatizados registran los eventos de dosificación, generan registros confiables y minimizan la exposición del operador a sustancias peligrosas, además de permitir la incorporación de protocolos de parada de emergencia y detección de fallos.[14]

## 2.3 Instrumentación y sensores aplicables

### 2.3.1 Sensores de nivel

Para un sistema automatizado de dosificación, es necesario que el control del nivel de aditivo sea eficiente y confiable. Para esto, existen varios tipos de sensores de nivel, como los que se van a mencionar a continuación.

#### Sensores de flotador

Operan mediante un dispositivo mecánico que se eleva o desciende con el líquido. Activan un interruptor cuando el nivel del líquido alcanza cierto punto; son especialmente útiles en aplicaciones donde se puede tener contacto directo con el líquido sin inconveniente. Son de bajo costo y de mantenimiento mínimo, pero son susceptibles a fallos por acumulación de sólidos.[15]

#### Sensores ultrasónicos

Permiten hacer mediciones sin contacto mediante ondas sonoras para determinar la distancia al fluido; miden el tiempo que tarda la onda en regresar tras rebotar en la superficie del líquido. Estos sensores se utilizan ampliamente porque son útiles con sustancias corrosivas o viscosas; además, al no presentar piezas móviles, se reduce el desgaste mecánico. Su desempeño se puede ver afectado por la agitación del líquido, la presencia de vapores o espuma en la superficie.[16]

#### Sensores capacitivos

Detectan cambios en la constante dieléctrica del medio entre dos placas, conforme varía el nivel del líquido. Su rendimiento puede variar según las propiedades dieléctricas del medio y requiere una calibración precisa para cada tipo de fluido.[17]

## **Sensores por electrodos**

Detectan puntualmente el nivel en líquidos conductores, mediante la medición de la conductividad de un electrodo de referencia y uno o más electrodos de nivel. Estos detectan la presencia de líquido al cerrar un circuito eléctrico cuando el fluido entra en contacto con ellos. Siempre que se utilicen materiales resistentes a las características corrosivas del líquido, se presenta una alta compatibilidad. Sin embargo, no son útiles en líquidos no conductivos, como aceites o solventes orgánicos.[18]

### **2.3.2 Sensores de flujo**

Los sensores de flujo permiten medir y controlar la cantidad de fluido que circula por una tubería. A continuación, se describen tres tipos ampliamente utilizados.

#### **Sensores de flujo electromagnéticos**

También llamados caudalímetros magnéticos, operan bajo la ley de la inducción electromagnética. Cuando el líquido conductor fluye por la tubería, se induce un voltaje proporcional a la velocidad del flujo, el cual puede ser detectado por electrodos. No requieren partes móviles y son muy precisos, especialmente en entornos con fluidos corrosivos o viscosos. [19]

#### **Sensores de flujo másicos**

Miden la masa del fluido que fluye por la tubería, independientemente de su temperatura o presión. Son extremadamente precisos y aplicables con líquidos como las mezclas de aditivos que presentan densidad variable. [20]

#### **Sensores de flujo tipo turbina**

Incluyen una turbina en la trayectoria del fluido; a medida que este pasa, hace girar la turbina a una velocidad proporcional al flujo; un sensor detecta las revoluciones de la turbina para completar la medición. Sin susceptibles al desgaste mecánico, obstrucciones y daños por partículas sólidas. [21]

### 2.3.3 Sensores de presión

Dos tecnologías utilizadas para monitorear la presión de los fluidos son los sensores piezoeléctricos y los manómetros electrónicos, los cuales se describen a continuación.

#### Sensores piezoeléctricos

Están basados en el principio de que algunos materiales generan una carga eléctrica cuando son sometidos a una presión. Son altamente sensibles, precisos y rápidos, por lo que se utilizan en sistemas que requieren detección inmediata de variaciones. [22]

#### Manómetros electrónicos

También llamados transductores de presión, convierten la presión mecánica en una señal eléctrica mediante sensores de tipo resistivo, capacitivo o piezoresistivo. Una de sus ventajas es que permiten la integración directa con PLCs y sistemas SCADA, lo que facilita la recolección de datos para trazabilidad y mantenimiento predictivo.[23]

### 2.3.4 Sensores de temperatura

El control de la temperatura permite mantener la estabilidad de los aditivos y garantizar una mezcla adecuada. En el caso de los adhesivos a base de almidón, se permite asegurar la correcta disolución de los gránulos de almidón. Los sensores más utilizados para esto son los RTDs (Resistance Temperature Detectors) y los termopares.

#### RTDs (Resistance Temperature Detectors)

La resistencia eléctrica de un metal varía de forma conocida con la temperatura. Los RTDs funcionan a partir de este principio; generalmente están hechos de platino y tienen una alta exactitud, aunque son más costosos y lentos en comparación con los termopares. [24]

## **Termopares**

Están compuestos por la unión de dos metales distintos que generan una tensión eléctrica proporcional a la diferencia de temperatura. Son ideales para aplicaciones dinámicas y que requieran una respuesta inmediata; son aptos en entornos de altas temperaturas (hasta 1800 °C) y son más económicos que los RTDs; sin embargo, tienden a degradarse y no son tan precisos. [25]

## **2.4 Actuadores industriales y mecanismos de control de flujo**

### **2.4.1 Tipos de válvulas**

#### **Válvulas solenoides**

Son actuadores electromecánicos; controlan el flujo mediante la activación de un solenoide que mueve un émbolo interno. Se utilizan en aplicaciones automatizadas; presentan una rápida respuesta y bajo consumo energético. Los sistemas de dosificación llevan a cabo la apertura y el cierre rápidos mediante una señal eléctrica. [26]

#### **Válvulas neumáticas**

Funcionan mediante presión de aire comprimido; son robustas, seguras en ambientes hostiles y no necesitan electricidad. Existen varios tipos, como las válvulas de asiento, válvulas de diafragma y válvulas de bola operadas neumáticamente; estas se pueden integrar en sistemas de automatización mediante controladores lógicos programables (PLC). [27]

#### **Válvulas de aguja**

Internamente están diseñadas con un vástago delgado y cónico que permite ajustar de manera gradual el paso del fluido. Son ideales para dosificaciones finas y de calibración exacta, ya que están diseñadas para el control preciso de caudales bajos de líquidos o gases. [28]

### **Válvulas de bola**

Están compuestas por una esfera perforada que, al girar, permite o bloquea el paso del fluido. Su cierre hermético es altamente confiable; son duraderas y de bajo mantenimiento. Son adecuadas para líquidos viscosos; sin embargo, el control del caudal no es tan preciso como en otro tipo de válvulas. [29]

### **Válvulas mariposa**

Este tipo de válvulas utiliza un disco rotativo central para permitir o bloquear el paso del fluido. Se utilizan en tuberías de amplio diámetro; sin embargo, al igual que las válvulas de bola, no son adecuadas para sistemas donde se requiere un control preciso del caudal, ya que su capacidad de modulación es reducida. [30]

### **Válvulas de asiento inclinado**

Se caracterizan por tener el eje del vástago dispuesto en un ángulo con respecto al conducto de paso del fluido; este ángulo típicamente es de  $45^\circ$ . Funcionan mediante actuadores neumáticos, por lo que su automatización es eficiente y de respuesta rápida. Son robustas y se fabrican en materiales como acero inoxidable y sellos de PTFE. [31]

## **2.4.2 Bombas dosificadoras**

### **Bombas de diafragma**

Utilizan un diafragma flexible que se mueve hacia adelante y hacia atrás, creando succión y presión que estimulan el flujo del líquido; son adecuadas para movilizar fluidos químicos o abrasivos, ya que el mecanismo de bombeo se encuentra aislado completamente del fluido. Además, permiten mover pequeños volúmenes de forma precisa, lo que les confiere alta seguridad operativa. [32]

## **Bombas centrífugas**

Se utilizan ampliamente en la industria, ya que permiten transportar altos volúmenes de fluido a baja presión mediante un impulsor giratorio. Son especialmente eficientes movilizándolo líquidos de baja viscosidad; sin embargo, no son la mejor opción para la dosificación precisa, ya que dificultan el control del caudal instantáneo. [33]

## **2.5 Materiales industriales para componentes en contacto con aditivos**

### **2.5.1 Acero inoxidable**

La selección adecuada de materiales es fundamental para garantizar la seguridad del producto, la resistencia a la corrosión y la durabilidad del sistema. En aplicaciones con adhesivos, el acero inoxidable es ampliamente utilizado por sus propiedades mecánicas y su resistencia a la oxidación. Las aleaciones más comunes incluyen AISI 304, AISI 316 y AISI 316L.

#### **AISI 304**

Es una aleación de cromo-níquel resistente a la corrosión en ambientes atmosféricos, así como en presencia de ácidos suaves. Es ideal para tuberías, tanques de almacenamiento y componentes en contacto con alimentos. Presenta una alta soldabilidad, conformabilidad y limpieza.[34]

#### **AISI 316**

Es una aleación con una adición de molibdeno (2-3 %), ideal para ambientes más agresivos, en contacto con químicos corrosivos. El molibdeno incrementa su resistencia a la corrosión y lo hace adecuado para entornos marinos y de procesamiento de productos farmacéuticos y químicos; por lo tanto, es más confiable que el 304 para manejar fluidos corrosivos.[35]

## **AISI 316L**

Es una versión del AISI 316 con bajo contenido de carbono; por esto, la formación de carburos durante la soldadura es menor, lo que lleva a una mínima corrosión intergranular. Es utilizado en instalaciones alimentarias, biotecnológicas y sanitarias.[35]

### **2.5.2 PVC (Cloruro de Polivinilo)**

Existen en el mercado alternativas atractivas por sus propiedades de resistencia química y costos bajos, como los materiales poliméricos. Una de estas opciones es el Cloruro de polivinilo (PVC). El PVC se utiliza en tuberías y contenedores, es un termoplástico cuya principal ventaja es su resistencia a una amplia gama de químicos, así como su bajo costo, sin embargo, su resistencia térmica es muy limitada y se degrada a temperaturas superiores a 65 °C. [36]

### **2.5.3 Polietileno (PE)**

Otro material polimérico de bajo costo es el polietileno, particularmente en sus variantes de alta densidad. Este material presenta una alta resistencia química y mecánica, además de ser muy flexible, por lo que se adapta a instalaciones con vibración o movimiento. En comparación con el PVC, su resistencia térmica es mayor. [37]

### **2.5.4 PTFE (Politetrafluoroetileno)**

El PTFE, más conocido como teflón, es un polímero de alto rendimiento, con una alta resistencia química; además, tiene un amplio rango térmico operativo (hasta 260 °C). En el manejo de adhesivos, su baja fricción y antiadherencia lo hacen ideal para fluidos viscosos. [37]

## 2.6 Controladores industriales

Los controladores industriales son dispositivos electrónicos que constituyen el núcleo de los sistemas de automatización en la industria; supervisan y ejecutan operaciones mediante la recepción de señales de campo, en tiempo real y con alta fiabilidad.

### 2.6.1 PLC (Controladores Lógicos Programables)

Un PLC es un dispositivo electrónico diseñado para ambientes industriales, con capacidad de resistir perturbaciones electromagnéticas, vibraciones y humedad. Su función es ejecutar secuencias de operaciones definidas en ciclos repetitivos de lectura, procesamiento y salida, definidas por un programa previamente establecido.

Entre sus principales ventajas se encuentran su facilidad de programación mediante lenguajes estandarizados (como ladder y bloques funcionales) y la escalabilidad de su arquitectura. Estas características los convierten en la opción preferida para aplicaciones que requieren automatización industrial continua, como líneas de producción, sistemas de dosificación y monitoreo de procesos.[38]

Algunas series como Siemens (SIMATIC S7), Allen-Bradley (CompactLogix, Control Logix) o Mitsubishi Electric (FX y Q) son utilizadas por su robustez y adaptabilidad a aplicaciones críticas. Además, los PLC modernos integran protocolos de comunicación como PROFINET, Ethernet/IP y OPC UA, alineándose mediante la conectividad con SCADA, análisis predictivo y control distribuido.[39]

### 2.6.2 Alternativas: Relés cableados y microcontroladores

Los relés cableados son dispositivos electromecánicos cableados que permiten establecer lógicas de control mediante conexiones físicas entre relés, interruptores y contactos auxiliares. Su uso tiene limitaciones en términos de flexibilidad y mantenimiento y ha sido reemplazado progresivamente por soluciones integradas programables.[40]

Los microcontroladores son circuitos integrados que combinan una unidad central de procesamiento (CPU), memoria y periféricos de entrada y salida en un solo chip, por lo que

pueden ejecutar tareas de control de forma eficiente. Se utilizan en automatizaciones que requieren un diseño personalizado. [41]

## 2.7 Automatización industrial

### 2.7.1 Arquitectura de sistemas automatizados

Un sistema automatizado industrial se compone de dispositivos y capas que interactúan de forma jerárquica para controlar los procesos productivos de manera eficiente. Esta arquitectura incluye sensores que recogen datos del entorno, actuadores que ejecutan acciones, controladores que procesan señales y toman decisiones, y sistemas de supervisión. Estas capas se organizan en niveles: campo (sensores, actuadores), control (PLCs), supervisión (SCADA o interfaces HMI) y gestión o ERP. Este enfoque asegura la escalabilidad, modularidad y capacidad de diagnóstico del sistema. [42]

### 2.7.2 Entradas/salidas discretas y analógicas

Los sistemas automatizados dependen de señales para interactuar con el entorno. Las señales discretas o digitales representan estados binarios y son comunes en botones, sensores de proximidad o válvulas. Por otro lado, las señales analógicas son valores continuos dentro de un rango, como la presión, el nivel, la temperatura, y son esenciales en procesos que requieren precisión. Para garantizar el comportamiento deseado del sistema de automatización, son fundamentales la correcta identificación y el tratamiento de estos tipos de señales. [43]

### 2.7.3 Integración entre sensores, actuadores y controladores

Una vez establecida la arquitectura del sistema automatizado, debe darse la integración efectiva entre sensores, actuadores y controladores. Los sensores proporcionan la información del entorno, que el controlador debe interpretar para tomar decisiones lógicas o de regulación; todas estas decisiones deben traducirse oportunamente en acciones a través de actuadores. Una integración eficiente no solo depende del hardware, sino también del diseño de control, del protocolo de comunicación utilizado y de la sincronización entre los componentes. [38]

### 2.7.4 Interfaces hombre-máquina básicas

Una interfaz hombre-máquina o HMI, por sus siglas en inglés, permite a los operarios interactuar con el sistema automatizado de forma intuitiva y visual. Permiten que el operador pueda monitorear su funcionamiento, introducir parámetros o responder ante alarmas. Las interfaces más básicas pueden ser pantallas táctiles integradas en el PLC, pantallas LCD simples, paneles de botones con luces indicadoras, entre otras. Su diseño debe priorizar la simplicidad y facilidad de navegación. Un HMI mejora la eficiencia operativa y reduce la posibilidad de errores humanos, además de aumentar la seguridad en entornos industriales. [44]

## 2.8 Seguridad e higiene en procesos industriales

### 2.8.1 Protección del operador ante productos corrosivos

En la formulación de adhesivo se manipulan sustancias químicas corrosivas, por lo que es fundamental implementar mecanismos de protección para el operador. Estos mecanismos incluyen la implementación de medidas como el uso de equipo de protección personal (EPP), como guantes, gafas protectoras, delantales resistentes a químicos, así como barreras físicas y sistemas de dosificación aislados que evitan el contacto directo con el producto. El diseño de sistemas automatizados debe tomar en cuenta la prevención de fugas, la ventilación adecuada y los sensores de detección de químicos para disminuir los riesgos para los operarios. [45]

### 2.8.2 Seguridad eléctrica y neumática

Para la instalación segura de los equipos eléctricos en maquinaria, deben seguirse estándares de seguridad, como la norma IEC 60204-1. Esta establece la incorporación de dispositivos de protección como relevadores térmicos, disyuntores, interruptores de emergencia y conexión a tierra. Para los sistemas neumáticos, utilizados en válvulas y actuadores, es necesario establecer una protección contra sobrepresión, control de fugas y una desconexión segura al realizar mantenimientos, como establece la norma ISO 4414. [46]

# Capítulo 3

## Metodología

La metodología de Karl Ulrich y Steven Eppinger, descrita en su libro *Diseño y Desarrollo de Productos*, se emplea debido a su amplia aceptación en la ingeniería de diseño. Esta metodología se selecciona por su enfoque estructurado, iterativo y orientado a resultados funcionales, lo que facilita la organización del proceso de diseño y la implementación del sistema propuesto.

La elección se justifica por la naturaleza del proyecto, definido como un sistema técnico que debe satisfacer necesidades específicas del proceso industrial bajo condiciones reales de operación. Además, permite abordar el diseño desde la conceptualización hasta la validación y proporciona una guía clara para el análisis, la generación de alternativas, la selección de soluciones, la implementación técnica y la verificación del desempeño.

En el presente proyecto, la metodología se adapta y se siguen las etapas clásicas, considerando el entorno de trabajo y la problemática identificada en la planta. Esta adaptación es la siguiente:

- En primer lugar, se llevará a cabo una investigación exhaustiva del sistema actual de formulación y distribución de goma, con énfasis en el proceso de aplicación del aditivo anticoagulante. La recopilación de datos se realizará mediante observación directa, entrevistas con los operadores y el personal responsable de la mejora continua. Además, se efectuarán pruebas técnicas para asegurar el cumplimiento de los estándares de calidad de la empresa.

- Después de la investigación contextual y la identificación de las variables críticas, se definirán los requerimientos técnicos que debe cumplir el nuevo sistema, priorizando criterios como compatibilidad con el entorno, automatización, confiabilidad y bajo impacto en la infraestructura existente.
- Posteriormente, se presentarán propuestas para el sistema de dosificación, considerando diversas configuraciones físicas y esquemas de automatización funcionales para este caso. Estas propuestas serán evaluadas conforme a los criterios establecidos y se seleccionará la opción más adecuada.
- Una vez seleccionada la propuesta, se procederá a su implementación en la línea de producción. Esta etapa incluye la construcción e instalación del sistema de bombeo, la integración de sensores, la programación de PLC y la ejecución de pruebas funcionales y de calidad.
- Finalmente, la validación del sistema se realizará mediante los indicadores técnicos definidos previamente, incluyendo pruebas de viscosidad y desempeño durante la operación. Los resultados obtenidos se compararán con las condiciones iniciales para verificar la mejora alcanzada.

Esta metodología asegura que el diseño implementado responda al problema identificado y garantiza una solución replicable y de fácil mantenimiento.

## **3.1 Identificación de necesidades del cliente**

### **3.1.1 Ideas clave obtenidas de la entrevista**

Se realizó una entrevista con el operador responsable del uso y mantenimiento de la cocina de goma. Se recopilaron ideas, experiencias y observaciones del usuario sobre el proceso de aplicación manual del aditivo y las implicaciones de una posible automatización. A continuación, se presentan los puntos más relevantes:

1. El aditivo utilizado en la formulación de goma es un líquido fluido y corrosivo.

2. El aditivo se cristaliza si permanece estancado o si se expone directamente a la luz del sol.
3. El aditivo debe almacenarse a temperatura ambiente para mantener su estabilidad.
4. La aplicación del aditivo se realiza en el momento en que entra un nuevo lote de goma al sistema, su vida útil es de aproximadamente 4 horas.
5. El aditivo no requiere ninguna preparación adicional.
6. La goma recirculante se encuentra a temperaturas entre 35 y 40 °C, mientras que el aditivo debe permanecer a temperatura ambiente, previo a la aplicación.
7. El aditivo es transportado manualmente por el operador desde un contenedor tipo “tanqueta” hasta el punto de mezcla con la goma, con un pichel.
8. La medición del aditivo se realiza con un recipiente graduado con un volumen preestablecido (Por el pichel).
9. La cantidad que se aplica del aditivo es constante, pero esta varía dependiendo de la cantidad servida por el operador.
10. La función del aditivo es otorgar elasticidad y cuerpo a la goma (realce de características), lo que incide en la viscosidad y capacidad de pegado de esta.
11. La baja viscosidad de la goma afecta negativamente el pegado del cartón, ya que lo suaviza al secar.
12. La inclusión excesiva de aditivo baja la viscosidad y produce sobreaplicación, lo que también genera bajas en la calidad del cartón.
13. El momento de aplicación de aditivo es crítico porque la mezcla debe hacerse con el lote de goma nuevo que entra al sistema, no con la goma recirculante.
14. Si el aditivo se aplica en el momento incorrecto, se pierde la efectividad de la goma y se compromete la calidad del pegado.
15. Si el operador olvida aplicar el aditivo, la calidad de la goma y el pegado se ve afectada; si, por el contrario, se aplica una doble dosis, la goma puede arruinar el cartón.

16. El sistema actual no tiene ningún mecanismo para validar que el aditivo se haya aplicado correctamente.
17. La verificación de que la goma tiene en su composición el aditivo se realiza con las pruebas de calidad posteriores a la mezcla: viscosidad y prueba de yodo.
18. El proceso manual genera errores por omisión o duplicación de la dosis, debido a la falta de controles automáticos.
19. Cuando se para la línea de producción, si el aditivo ya fue aplicado, pero no se utiliza la goma, esta pierde sus propiedades pasadas las 4 horas.
20. Si el paro de la línea de producción se prolonga, la goma debe reacondicionarse antes de una nueva aplicación del aditivo.
21. Si la goma se queda estancada en la tubería, se seca y obstruye el sistema; por esto, necesita recircular constantemente.
22. Si no se aplica el aditivo, la goma pierde sus propiedades adhesivas, aunque puede pegar de forma marginal.
23. El operador debe usar protección especializada para manipular el aditivo: guantes de neopreno, careta y delantal.
24. El operador debe estar atento al nivel de producto en el tanque de goma. Cuando está bajo, se incorpora nueva goma, momento en el que se debe aplicar el aditivo.
25. Un sistema de dosificación automático debería detectar el ingreso de goma nueva y activar la dosificación correspondiente de forma sincronizada.
26. El sistema de dosificación manual actual representa una dependencia total del operador, lo que introduce riesgo de error humano.
27. La eventual automatización del sistema reducirá la pérdida de aditivo, mejorará la calidad del producto final y evitará reprocesos.
28. El aditivo no se debe mezclar desde la cocina de goma, ya que, si no se consume el lote, se desperdicia.

29. El proceso de mezcla actual no cuenta con ninguna retroalimentación ni registro del número de ciclos realizados.
30. Dado que el aditivo es fluido, la homogeneización con la goma ocurre de manera instantánea.
31. La goma recuperada tras los paros se almacena en tanques auxiliares y se reutiliza, por lo que es fundamental evitar la presencia de aditivo inactivo.
32. La automatización facilita la trazabilidad de la dosificación y proporciona un mayor control sobre la calidad de la goma.
33. El sistema debe poder desarmarse fácilmente para su limpieza.

### 3.1.2 Transformación y jerarquización de las necesidades del cliente

A partir de la recopilación de ideas durante la entrevista técnica, se identificaron múltiples aspectos críticos del sistema, los cuales representan oportunidades para el diseño y la automatización del sistema de dosificación de aditivo. Estas ideas se sintetizan en necesidades primarias y secundarias. Las necesidades primarias corresponden a aspectos fundamentales para el funcionamiento del sistema, mientras que las secundarias aportan valor añadido, operatividad y eficiencia. Las necesidades primarias se consideran obligatorias para el éxito del proyecto, mientras que las necesidades secundarias serán evaluadas en función de su factibilidad e impacto operativo.

**Tabla 3.1:** Transformación de ideas a necesidades del cliente.

Nº	Necesidad identificada	Tipo	Fuente(s)
N1	El sistema debe dosificar el aditivo sin intervención del operador.	Primaria	Puntos 7, 15, 16, 26
N2	La dosificación debe ser automática y activarse al detectar el ingreso de nuevo lote de goma.	Primaria	Puntos 4, 24, 25

*Continúa en la siguiente página*

Tabla 3.1 – *Continuación de la página anterior*

<b>Nº</b>	<b>Necesidad identificada</b>	<b>Tipo</b>	<b>Fuente(s)</b>
N3	La cantidad de aditivo debe ser justa para la formulación.	Primaria	Puntos 9, 10, 11
N4	El sistema debe evitar errores de subdosificación o sobredosificación.	Primaria	Puntos 12, 15, 18
N5	La mezcla del aditivo con la goma debe ser homogénea e instantánea.	Primaria	Puntos 24, 30
N6	El sistema debe asegurar que el aditivo no permanezca estancado ni expuesto al sol.	Primaria	Puntos 2, 3
N7	Debe garantizarse que la goma sin aditivo no reciba dosis cuando no sea necesario.	Primaria	Puntos 19, 20, 31
N8	El sistema debe prevenir el desperdicio de aditivo tras paros o ciclos no utilizados.	Primaria	Puntos 19, 28
N9	El aditivo debe mantenerse a temperatura ambiente.	Secundaria	Puntos 3, 6
N10	El diseño debe permitir fácil mantenimiento y limpieza del sistema.	Secundaria	Puntos 33
N11	El sistema debe posibilitar la trazabilidad del número de ciclos de dosificación.	Secundaria	Puntos 29, 32
N12	El diseño debe considerar las características físicas y químicas del aditivo.	Secundaria	Puntos 1, 2, 21, 22
N13	El operador no debe tener contacto directo con el aditivo.	Primaria	Punto 23
N14	El sistema debe ser compatible con los tanques existentes y el proceso actual.	Secundaria	Puntos 8, 13, 14, 17, 27, 32

## 3.2 Especificaciones del producto

### 3.2.1 Métricas

Una vez identificadas y jerarquizadas las necesidades del cliente, se procede a generar métricas, de modo que cada necesidad tenga al menos una métrica asociada. En algunos casos, múltiples necesidades pueden estar representadas por una misma métrica, y una necesidad puede requerir más de una métrica para ser descrita adecuadamente.

Estas métricas establecen parámetros cuantificables que facilitan la evaluación del cumplimiento de las necesidades durante el desarrollo e implementación del sistema. Para cada métrica se define una unidad de medida, que servirá como referencia para la posterior asignación de valores meta. La importancia de cada métrica se determina a partir de la percepción del operador, quien durante la entrevista valoró cada métrica en una escala de 1 a 5, donde 5 representa la mayor importancia. La selección de las unidades se fundamenta en los métodos de medición actualmente empleados en la planta, así como en la experiencia de los usuarios y técnicos involucrados en el proceso.

**Tabla 3.2:** Métricas a evaluar y sus unidades de medida.

Nº	Métrica	Necesidad que satisface	Descripción de la necesidad	Imp.	Unidad
1	% de ciclos de dosificación realizados sin intervención	El sistema debe dosificar el aditivo sin intervención del operador	El sistema debe operar de forma autónoma sin requerir participación directa del operador	5	%
2	Activación automática del sistema por detección de lote	La dosificación debe ser automática y activarse al detectar el ingreso de nuevo lote de goma	El sistema debe detectar el ingreso de un nuevo lote de goma y activar automáticamente la dosificación	5	Sí/No
3	Volumen dosificado para formulación	La cantidad de aditivo debe ser justa para la formulación.	El sistema debe aplicar el volumen de aditivo de acuerdo con la receta técnica de la formulación	5	mL/lote
4	Error de dosificación (sub/sobredosificación)	El sistema debe evitar errores de subdosificación o sobredosificación	El sistema debe mantener la dosis de aditivo dentro del rango óptimo de operación	5	% de error

*Continúa en la siguiente página*

Tabla 3.2 – *Continuación de la página anterior*

Nº	Métrica	Necesidad que satisface	Descripción de la necesidad	Imp.	Unidad
5	Tiempo promedio de descarga	La mezcla del aditivo con la goma debe ser homogénea e instantánea	La aplicación del aditivo debe generar una mezcla homogénea de forma inmediata en el tanque de mezcla	3	s
6	Tiempo máximo sin circulación del aditivo	El sistema debe asegurar que el aditivo no permanezca estancado	El sistema debe mantener en movimiento el aditivo para evitar cristalización o pérdida de propiedades	5	min
7	% de ciclos sin adición cuando no hay consumo	Debe garantizarse que la goma sin aditivo no reciba dosis cuando no se consume	Se debe evitar aplicar aditivo a goma que no se esté consumiendo, para prevenir su desperdicio	3	%
8	% de aditivo aplicado tras paro	El sistema debe prevenir el desperdicio de aditivo tras paros o ciclos no utilizados	El sistema debe tener mecanismos para evitar que el aditivo se desperdicie si no se consume por un paro en la línea	4	%
9	Temperatura de almacenamiento del aditivo	El aditivo debe mantenerse a temperatura ambiente	El aditivo debe conservarse en condiciones adecuadas para no alterar sus propiedades	4	°C
10	Tiempo promedio requerido para mantenimiento	El diseño debe permitir fácil mantenimiento y limpieza del sistema	El sistema debe diseñarse para que su mantenimiento y limpieza se realicen con facilidad y rapidez	3	min
11	Registro de ciclos de dosificación	El sistema debe contar con trazabilidad del número de ciclos de dosificación	Se debe llevar un control automático y seguro de la cantidad de ciclos realizados	2	Sí/No
12	Compatibilidad química y física del sistema con el aditivo	El diseño debe considerar las características físicas y químicas del aditivo.	El diseño debe resistir la corrosión y además garantizar que el aditivo se mantenga en la sobra	4	Sí/No
13	Número de incidentes por contacto operador-aditivo	El operador debe estar protegido de contacto directo con el aditivo	El sistema debe evitar el contacto entre el operador y el aditivo mediante dispositivos o procedimientos	5	Conteo

*Continúa en la siguiente página*

Tabla 3.2 – *Continuación de la página anterior*

Nº	Métrica	Necesidad que satisface	Descripción de la necesidad	Imp.	Unidad
14	Compatibilidad con el sistema actual	El sistema debe ser compatible con los tanques existentes y el proceso actual	El sistema debe integrarse con la infraestructura existente para facilitar su adopción y operación	5	Sí/No

### 3.2.2 Obtención de las métricas

A continuación, se expone el razonamiento utilizado para determinar las métricas definidas en la Tabla 3.2. Algunas métricas provienen directamente de las respuestas obtenidas en la entrevista al usuario, por lo que no se detalla su justificación. Se listan las métricas cuya definición se realizó mediante análisis técnico, inferencia del contexto operativo o con base en buenas prácticas de diseño de sistemas mecatrónicos en entornos industriales.

**Métrica 2:** Se establece una métrica binaria para el funcionamiento autónomo del sistema de dosificación, condición crítica para garantizar la independencia operativa y eliminar errores de omisión. La activación debe ser automática tras la detección de un nuevo lote.

**Métrica 3:** La cantidad de aditivo se determina según la formulación preestablecida, por lo que se mide el volumen entregado por lote.

**Métrica 4:** Los errores de sobredosificación o subdosificación se cuantificarán como el porcentaje de ciclos en los que la aplicación se encuentra fuera del rango definido en 100 aplicaciones, lo que permitirá establecer umbrales de alerta en la implementación.

**Métrica 5** Dado que el aditivo es un líquido muy fluido, la mezcla ocurre de inmediato durante la transferencia a la goma; por tanto, el sistema debe garantizar la homogeneidad instantánea. La verificación de la homogeneidad se realizará mediante pruebas de calidad (viscosidad).

**Métrica 6:** Para evitar el asentamiento o estancamiento del producto, se define como métrica el tiempo máximo permitido sin flujo en las líneas del sistema, considerando las propiedades químicas del aditivo, que es corrosivo, sensible a la luz solar y a la temperatura, y propenso a la cristalización.

**Métrica 10:** Para asegurar la sostenibilidad del diseño, se establece la métrica asociada al

tiempo promedio de limpieza y operaciones de mantenimiento, con el objetivo de cuantificar la facilidad de mantenimiento del sistema, considerando que el aditivo es corrosivo y el producto puede estar expuesto a contaminantes.

**Métrica 11:** Para garantizar la trazabilidad del proceso de adición, se define como métrica la capacidad del sistema para registrar el número de ciclos de dosificación realizados. El almacenamiento de estos datos en memoria o base de datos debe ser accesible para el operador o el personal de control de calidad.

**Métrica 13:** Debido a las características peligrosas del aditivo, se establece como métrica la existencia de barreras de protección físicas para el operador, tales como válvulas cerradas, contenedores herméticos y mecanismos de aislamiento que eviten el contacto directo con el producto corrosivo.

**Métrica 14:** Esta métrica evalúa la compatibilidad del sistema implementado con los tanques y líneas actuales de distribución. Esta condición de diseño será considerada positiva siempre que el sistema no requiera modificaciones en la línea de distribución existente ni interrumpa la producción.

### 3.2.3 Valores marginales e ideales

La metodología propuesta por Ulrich y Eppinger establece que el valor ideal representa el desempeño deseado, mientras que el valor marginal es el límite mínimo aceptable para que el sistema sea considerado funcional. Una vez definidas las métricas y sus unidades de medida, se determinaron los valores ideales y marginales asociados a cada una. Para ello, se utilizó la información obtenida en la entrevista técnica con el operador, las condiciones actuales del sistema de distribución de goma y el criterio técnico, además de considerar las restricciones físicas y operativas del entorno industrial donde se implementará el sistema.

La tabla 3.3 resume los valores definidos para cada métrica, que se emplearán como referencia durante la fase de validación y verificación del diseño y en el establecimiento de los criterios de éxito del proyecto.

**Tabla 3.3:** Valores marginales e ideales definidos para las métricas.

Nº	Importancia	Unidad	Valor Ideal	Valor Marginal
1	5	%	100%	$\leq 95\%$
2	5	Sí/No	Sí	Sí
3	5	mL/lote	1150	1140 - 1160
4	5	% error	$\leq 1\%$	$\leq 5\%$
5	3	Segundos	$\leq 5$ s	$\leq 7$ s
6	5	Minutos	$\leq 5$ min	$\leq 10$ min
7	3	%	100 %	$\geq 95\%$
8	4	%	0 %	$\leq 5\%$ ml
9	4	°C	24–28 °C	29–35 °C
10	3	Minutos	$\leq 30$ min	$\leq 60$ min
11	2	Sí/No	Sí	Sí
12	4	Sí/No	Sí	Sí
13	5	Conteo	0	$\leq 1$
14	5	Sí/No	Sí	Sí

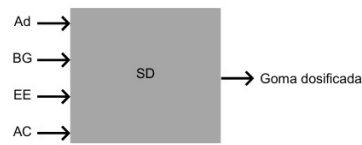
### 3.3 Generación de conceptos

#### 3.3.1 Descomposición funcional del problema

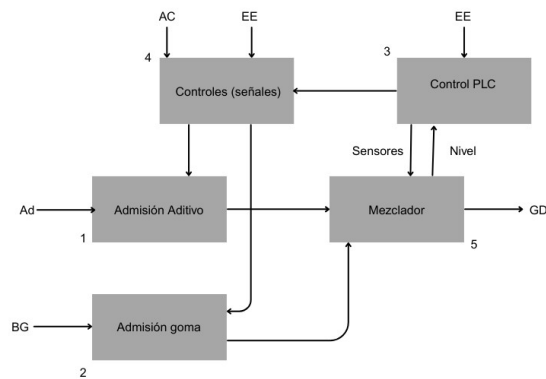
Para identificar el funcionamiento del sistema y definir sus componentes clave, se realiza una descomposición funcional de alto nivel basada en la metodología de Ulrich y Eppinger. Esta metodología permite representar el sistema como un conjunto de bloques interrelacionados que transforman entradas en salidas, facilitando el desarrollo posterior de conceptos y el diseño detallado.

La Figura 3.1 presenta el diagrama funcional propuesto para el sistema automatizado de dosificación de aditivos en formulaciones de goma (SD). Las entradas principales del sistema son: el aditivo (Ad), el bache de goma nuevo (BG), la energía eléctrica (EE) y el aire comprimido (AC). A partir de estas entradas, el sistema realiza una serie de transformaciones para generar como salida la goma dosificada (GD), la cual debe cumplir con las especificaciones técnicas de mezcla, viscosidad y calidad de pegado.

El sistema está compuesto por cinco bloques funcionales que definen su operación interna:



**Figura 3.1:** Descomposición general del problema.



**Figura 3.2:** Descomposición funcional detallada del problema.

1. Admisión de aditivo.
2. Admisión de goma.
3. Control.
4. Señales de control.
5. Mezclador.

Cada uno de estos bloques funcionales cuenta con entradas y salidas específicas, cuya interacción posibilita una dosificación automatizada, precisa y segura del aditivo. La integración de estos subsistemas tiene como objetivo garantizar la homogeneidad en la dosificación, minimizar desperdicios y mantener la trazabilidad del proceso. La figura 3.2 muestra la descomposición funcional detallada del sistema.

Estos bloques funcionales se describen de la siguiente forma:

**Bloque 1: Admisión de Aditivo:** Este bloque corresponde a la parte del sistema responsable de incorporar el aditivo a la formulación de goma. En este bloque se da el suministro de aditivo a la mezcla en el momento y la proporción adecuados, de acuerdo con las condiciones de operación

**Bloque 2: Admisión de Goma:** En este bloque se ingresa el nuevo bache de goma al sistema. Es parte de la ruta de alimentación de materia prima al proceso. Se debe tomar en cuenta para la mezcla con el aditivo en el momento adecuado del ciclo.

**Bloque 3: Control:** Este bloque corresponde a los elementos que permiten interpretar el estado del sistema, tomar decisiones lógicas y dirigir la aplicación general. Gestiona el funcionamiento de las demás partes del sistema en función de las condiciones programadas y las señales recibidas.

**Bloque 4: Señales de Control:** Las señales de control corresponden a los canales de comunicación entre el sistema de control y los actuadores. Su función es transmitir las órdenes del sistema de control a los elementos que ejecutan las acciones, como aperturas o inicios de secuencia.

**Bloque 5: Mezclador:** En este bloque se lleva a cabo la integración del aditivo con la goma; físicamente, convergen en un solo sitio. El propósito del mezclador es facilitar que ambos componentes se combinen para obtener una mezcla con las propiedades deseadas antes de la distribución.

### 3.3.2 Proceso de búsqueda interna de conceptos

Se realizó una sesión de ideación para generar propuestas y soluciones dirigidas a cada uno de los subproblemas identificados en los bloques funcionales.

**Bloque 1: Admisión de Aditivo.** Se proponen las siguientes alternativas para su implementación, con base en el mecanismo mediante el cual se suministra el aditivo:

- **Alternativa A1: Dosificación por volumen predeterminado (cámara dosificadora).** Cada vez que se detecta un nuevo bache de goma, se libera un volumen fijo de aditivo predeterminado, garantizando la consistencia entre ciclos.

- **Alternativa A2: Dosificación por tiempo de apertura de válvula.** Tomando en cuenta el caudal de entrada, el aditivo se administra mediante una válvula que se abre durante un tiempo específico, determinado por el sistema de control.
- **Alternativa A3: Dosificación por bomba de desplazamiento positivo.** Un mecanismo de bombeo que asegura la entrega de un volumen preciso de aditivo por ciclo, lo que reduce la variabilidad por presión.
- **Alternativa A4: Dosificación por peso (células de carga).** El aditivo se determina por peso, el cual se mide y se dispensa hacia la mezcla, esto permite ajustes dinámicos (por formulación) y trazabilidad de consumo.
- **Alternativa A5: Gravedad controlada con válvula y sensor de nivel.** Desde un tanque elevado, el sistema libera el aditivo mediante la acción de una válvula, validada mediante sensores de la caída de nivel.

## **Bloque 2: Admisión de Goma.**

Este bloque corresponde al subsistema encargado de incorporar un nuevo bache de goma al ciclo. Aunque el mecanismo de ingreso ya está implementado, es necesario que sea reconocido y controlado automáticamente. Por consiguiente, se presentan las siguientes alternativas para su integración:

- **Alternativa B1: Sensor de nivel alto en el tanque de mezcla.** Mediante la señal de un sensor que detecte el incremento súbito del nivel de mezcla, asociado al ingreso de un nuevo bache, se puede activar la dosificación de aditivo.
- **Alternativa B2: Sensor de flujo en línea de entrada.** Se instala un sensor de caudal que identifica el paso de goma desde los tanques intermedios al sistema. La señal indica el momento de adición del aditivo.
- **Alternativa B3: Sensor de presión en línea de alimentación.** La variación de presión durante el ingreso del nuevo bache de goma puede utilizarse como el evento disparador para la dosificación automática de aditivo.
- **Alternativa B4: Temporización de ciclos programados.** Tomando en cuenta que existe un patrón conocido de consumo de goma en producción, es posible programar

un ciclo temporal regular de aplicación de aditivo, asociado al ingreso regular del bache de goma.

### **Bloque 3: Control.**

Este bloque es el responsable de procesar las señales de entrada (detección de nivel, activación del sistema, entre otras), generar las señales de control adecuadas y coordinar el funcionamiento de la dosificación. Estas son las alternativas para su implementación:

- **Alternativa C1: PLC industrial (CompactLogix, Micro800, Siemens S7-1200, etc.).** Un controlador lógico programable diseñado para entornos industriales se caracteriza por su robustez, capacidad de programación estructurada, facilidad de integración con sistemas existentes y conectividad con sensores y actuadores.
- **Alternativa C2: Microcontrolador programable (PIC, Atmel, STM32, Arduino industrial).** Esta es una opción flexible y de bajo costo; requiere un mayor desarrollo a nivel de programación y hardware, pero es favorable si se desea un sistema más compacto y personalizado.
- **Alternativa C3: Módulo lógico programable LOGO! de Siemens.** Este dispositivo está orientado a automatizaciones pequeñas; es fácil de programar y es económico. Su uso es ideal en sistemas con lógica discreta sencilla y sin posible expansión futura.
- **Alternativa C4: Control mediante relés y temporizadores electromecánicos.** Esta alternativa de control es completamente cableada, sin programación. Su implementación es simple y confiable para realizar tareas secuenciales básicas, pero carece de flexibilidad ante cambios y funciones complejas.
- **Alternativa C5: Control basado en FPGA (Field-Programmable Gate Array).** Esta es una plataforma altamente configurable para sistemas de alta velocidad; permite una lógica personalizada a nivel de hardware. Su complejidad y costo son mayores que los de otras opciones.
- **Alternativa C6: Sistema embebido con Raspberry Pi u otra plataforma Linux.** Esta opción es ideal cuando se requiere una capacidad de procesamiento

avanzada, aunque es menos robusta en ambientes industriales, por lo que requiere una protección adecuada. Permite integrar una interfaz gráfica, conectividad y registro de datos.

#### **Bloque 4: Señales de control.**

El bloque de señales de control comprende las señales de salida del sistema y las transforma en acciones físicas concretas sobre los actuadores del sistema. Este bloque incluye elementos eléctricos, neumáticos o una combinación de ambos, dependiendo de la naturaleza de los actuadores. Las alternativas consideradas para las señales de control son las siguientes:

- **Alternativa D1: Señales por relés de estado sólido (SSR).** Los relés electrónicos son silenciosos, confiables y presentan una larga vida útil, principalmente cuando se requiere una conmutación frecuente sin desgaste mecánico. Son especialmente útiles para activar elementos como válvulas eléctricas o bombas.
- **Alternativa D2: Señales por contactores electromecánicos.** Los contactores electromecánicos son ampliamente utilizados para manejar cargas mayores, como motores de bombas. Estos son robustos, fáciles de instalar y adecuados en entornos industriales, aunque son susceptibles al desgaste mecánico con el tiempo.
- **Alternativa D3: Activación de válvulas neumáticas mediante electroválvulas.** En este caso, las señales de control activan solenoides que gobiernan el paso de aire comprimido hacia actuadores neumáticos. Esta alternativa es ideal para ambientes húmedos, con cargas mecánicas fuertes; garantiza una respuesta rápida y segura sin riesgo eléctrico.
- **Alternativa D4: Activación de actuadores eléctricos por salidas digitales directas del controlador.** Es ideal para sistemas de baja carga que no requieren un aislamiento adicional o componentes intermedios; se utilizan directamente las salidas de un PLC, microcontrolador o relé lógico para accionar las válvulas eléctricas o bombas pequeñas.
- **Alternativa D6: Combinación de relés, contactores y electroválvulas.** Solución híbrida. Permite controlar tanto los elementos eléctricos como los neumáticos, adaptándose a los diferentes tipos de actuadores utilizados en el sistema.

### Bloque 5: Mezclador.

El mezclador es la zona física donde se lleva a cabo la integración del nuevo lote de goma con el aditivo. Este bloque debe asegurar una mezcla homogénea antes de que la goma ingrese al sistema de recirculación o aplicación. Las opciones contemplan mecanismos activos y pasivos para lograr la mezcla, aprovechando los elementos actuales en la planta.

- **Alternativa E1: Mezcla por sistema existente (sin modificaciones).** Toma en cuenta el sistema actual de mezclado en la planta: el aditivo se inyecta directamente sobre el nuevo bache de goma dentro del tanque, lo que permite una mezcla efectiva sin intervención adicional. Esta es la opción más sencilla desde el punto de vista de implementación y funciona en condiciones reales.
- **Alternativa E2: Mezclador mecánico con agitador de hélice interno.** Se incorpora un agitador eléctrico en el tanque donde se realiza la mezcla, el cual gira mediante un motor. Esta alternativa ofrece mayor control sobre la velocidad de mezcla, pero implica una modificación física del tanque.
- **Alternativa E3: Mezcla dinámica mediante válvula mezcladora tipo “T” con turbulencia.** Se basa en el uso de una válvula tipo “T” estática en el sitio donde el aditivo y la goma se encuentran, generando turbulencia en el cruce de flujo para facilitar la mezcla sin partes móviles.
- **Alternativa E4: Mezclador estático en línea.** Es un tubo con elementos internos fijos (hélices, deflectores) que generan un patrón de flujo turbulento, no tiene partes móviles, es de bajo mantenimiento y permite la mezcla en un espacio reducido.
- **Alternativa E5: Mezclado con recirculación forzada.** Esta alternativa consiste en enviar la mezcla de goma y aditivo hacia una línea de recirculación adicional que permita el paso repetido por un punto de agitación. Esto garantiza la homogeneización, pero implica una mayor complejidad, componentes adicionales y la modificación del flujo actual.

### 3.3.3 Búsqueda externa de conceptos

Con el objetivo de ampliar las soluciones técnicas aplicables a cada bloque del sistema propuesto, se realizó una búsqueda externa de conceptos, además de considerar alternativas comerciales. Estas soluciones complementan la búsqueda interna de conceptos realizada previamente.

#### Bloque 1: Admisión de aditivo.

- **Concepto E1:** Sistema de dosificación con bomba peristáltica marca Watson-Marlow serie 520, ampliamente utilizada en la industria química por su compatibilidad con productos corrosivos y facilidad de calibración manual o remota. Bombea hasta 3,5 L/min y alcanza presiones de hasta 2 bares. [47]
- **Concepto E2:** Dosificación controlada por electroválvula Burkert tipo 6213, sin necesidad de partes móviles internas. Es una válvula de diafragma servoasistida adecuada para su uso con líquidos. [48]
- **Concepto E3:** Uso de bomba dosificadora electromagnética SEKO Tekna Evo TPG603, apta para aplicaciones industriales con líquidos corrosivos y ajuste de caudal por señal analógica. [49]

#### Bloque 2: Admisión de goma.

- **Concepto E4:** Aplicación de bomba lobular Vogelsang VX136-210Q, especialmente diseñada para el transporte de líquidos viscosos, sin comprometer la integridad del fluido. Esta permite una capacidad de hasta 70 m<sup>3</sup>/h con una presión diferencial de hasta 2 bares. [50]
- **Concepto E5:** Control de ingreso de fluido mediante válvula de bola automatizada GF Piping Systems serie 546 Pro con actuador neumático integrado. Las válvulas de esta serie son aptas para fluidos corrosivos, ya que no poseen componentes metálicos en las zonas que entran en contacto directo con el fluido. [51]
- **Concepto E6:** Sensor de nivel por radar Vega VEGAPULS C 23 es un sensor no invasivo, compatible con productos viscosos y de baja reflectividad dieléctrica. [52]

**Bloque 3: Control.**

- **Concepto E7:** Controlador lógico programable Schneider Electric Zelio Logic SR3, orientado a automatización simple con interfaz HMI integrada. . [53]
- **Concepto E8:** Sistema de automatización basado en BeagleBone Black industrial, con sistema Linux embebido y puertos GPIO para manejo de señales. Es de bajo costo y apto para aplicaciones industriales y ambientes con temperaturas hostiles. [54]
- **Concepto E9:** Unidad de control industrial IDEC FC6A MicroSmart, diseñada para entornos industriales compactos con conectividad Ethernet y protocolo Modbus TCP. [55]

**Bloque 4: Señales de control.**

- **Concepto E10:** Sistema de actuación mediante relé de estado sólido Opto22 G4PB8H con optoacopladores industriales para aislamiento galvánico y respuesta rápida. [56]
- **Concepto E11:** Disposición de contactores modulares WEG CWC0, para control de cargas pequeñas en tableros de automatización. [57]
- **Concepto E12:** Empleo de acondicionadores de señal Phoenix Contact MINI MCR para interfaz entre sensores analógicos y señales digitales de control. [58]

**Bloque 5: Mezclador.**

- **Concepto E13:** Mezclador helicoidal de entrada tangencial tipo Kenics KMX-V, ideal para líquidos de baja viscosidad en procesos continuos. [59]
- **Concepto E14:** Cámara de mezcla en línea con difusores estáticos Koflo Blade Static Mixer, utilizada para homogeneización sin agitación mecánica. Estos utilizan elementos internos eficientes en condiciones de flujo turbulento. [60]
- **Concepto E15:** Mezclador con agitación neumática ARO IRM100, apto para aplicaciones industriales con contenedores medianos. [61]

### 3.3.4 Construcción de conceptos

Todas las alternativas identificadas para cada uno de los bloques funcionales del sistema se presentan en la Tabla 3.4. Esta tabla recopila las opciones derivadas tanto de la búsqueda externa como interna de conceptos y servirá como base para realizar las combinaciones posibles entre las soluciones parciales, así como para formular los conceptos finales del sistema de dosificación.

**Tabla 3.4:** Posibles soluciones de subproblemas para la formulación de conceptos.

Admisión de aditivo	Admisión de goma	Control	Señales de control	Mezclador
Dosificación por volumen.	Sensor de nivel alto en el tanque de mezcla.	PLC industrial.	Señales por relés de estado sólido (SSR).	Mezcla por sistema existente.
Dosificación por tiempo de apertura de válvula.	Sensor de flujo en línea de entrada.	Microcontrolador programable.	Señales por contactores electromecánicos.	Mezclador mecánico con agitador de hélice interno.
Dosificación por bomba de desplazamiento positivo.	Sensor de presión en línea de alimentación.	Control con relés.	Activación de válvulas neumáticas mediante electroválvulas.	Mezcla dinámica mediante válvula mezcladora tipo "T" con turbulencia.
Dosificación por peso.	Temporización de ciclos programados.	Siemens LOGO!	Activación de actuadores eléctricos por salidas digitales directas del controlador.	Mezclador estático en línea.
Gravedad controlada con válvula y sensor de nivel.	Bomba de lóbulos rotativos.	Control basado en FPGA.	Combinación de relés, contactores y electroválvulas.	Mezclado con circulación forzada.

*Continúa en la siguiente página*

Tabla 3.4 – *Continuación de la página anterior*

<b>Admisión de aditivo</b>	<b>de goma</b>	<b>Admisión de Control</b>	<b>de Señales de control</b>	<b>Mezclador</b>
Sistema de dosificación con bomba peristáltica.	Control de ingreso de fluido mediante válvula de bola automatizada.	Sistema embebido con Beagle Bone Black industrial.	Actuación mediante relé de estado sólido Opto22 G4PB8H.	Mezclador helicoidal de entrada tangencial.
Dosificación controlada por electroválvula.	Sensor de nivel por radar no invasivo.	Unidad de control industrial IDEC FC6A MicroSmart.	Disposición de controladores modulares WEG CWC0.	Cámara de mezcla en línea con difusores estáticos.
Bomba dosificadora electromagnética SEKO.		Empleo de convertidores de señal Phoenix Contact MINI MCR.	Mezclador con agitación neumática marca ARO IRM100.	

Posteriormente, aplicando criterios de ingeniería y considerando la factibilidad técnica, la compatibilidad entre componentes y el nivel de automatización requerido, se definieron cinco combinaciones viables para el sistema completo. Estas combinaciones se presentan en la Tabla 3.5, donde cada fila representa un concepto distinto formado por la selección de una alternativa para cada uno de los bloques del sistema propuesto. A partir de estas combinaciones, se realizará un análisis comparativo para determinar el concepto más adecuado para su desarrollo.

**Tabla 3.5:** Combinaciones propuestas para cada subproblema.

<b>Alt.</b>	<b>Admisión de aditivo</b>	<b>Admisión de goma</b>	<b>Control</b>	<b>Señales de control</b>	<b>Mezclador</b>
1	Dosificación por volumen predeterminado.	Sensor de nivel alto en el tanque de mezcla.	PLC industrial.	Activación de válvulas neumáticas mediante electroválvulas.	Mezclador mecánico con agitador de hélice interno.

*Continúa en la siguiente página*

Tabla 3.5 – *Continuación de la página anterior*

Alt.	Admisión de aditivo	Admisión de go- ma	Control	Señales de control	Mezclador
2	Dosificación por volumen predeterminado.	Temporización de ciclos programados.	Microcontrolador programable.	Activación de actuadores eléctricos por salidas digitales directas del controlador.	Mezclador estático en línea.
3	Dosificación por tiempo de apertura de válvula.	Sensor de presión en línea de alimentación.	PLC industrial.	Activación de válvulas neumáticas mediante electroválvulas.	Mezcla por sistema existente.
4	Gravedad controlada con válvula y sensor de nivel.	Sensor de nivel alto en el tanque de mezcla.	PLC industrial.	Activación de válvulas neumáticas mediante electroválvulas.	Mezcla por sistema existente.
5	Gravedad controlada con válvula y sensor de nivel.	Temporización de ciclos programados.	Microcontrolador programable.	Activación de actuadores eléctricos por salidas digitales directas del controlador.	Mezclador estático en línea.

## 3.4 Selección de conceptos

### 3.4.1 Filtrado de conceptos.

Una vez establecidas las combinaciones posibles de soluciones para cada uno de los subproblemas definidos, se procede a realizar un filtrado de conceptos. El objetivo de este filtrado es reducir el conjunto de alternativas a aquellas que presentan mayor viabilidad, considerando las condiciones reales del entorno de implementación del sistema.

Para esta etapa, se definieron criterios que permiten identificar los conceptos con mayores complicaciones o limitaciones para su implementación. De este modo, se garantiza que las alternativas seleccionadas para las siguientes etapas del proceso de diseño sean aceptables y factibles en términos de viabilidad técnica, operativa y económica.

Los criterios utilizados para este filtrado preliminar fueron:

1. **Precisión de aplicado:** Capacidad del sistema propuesto para dosificar de forma

exacta el aditivo requerido para la formulación de goma.

2. **Dificultad de implementación:** Complejidad técnica y logística para la implementación y puesta en marcha del nuevo sistema, tomando en cuenta los recursos disponibles.
3. **Capacidad de mantenimiento:** Facilidad de acceso, limpieza, reemplazo de piezas y diagnósticos en caso de fallos.
4. **Capacidad de crecimiento:** Permite una futura expansión o mejora del sistema mediante integración con nuevas tecnologías o adaptación a cambios en la formulación.
5. **Tiempo de aplicación:** Tiempo estimado para que el sistema ejecute la dosificación del aditivo una vez detectado el ingreso de un nuevo lote de goma.
6. **Tamaño del sistema:** Espacio físico requerido para los componentes y su impacto en el área disponible en la cocina de goma.
7. **Confiabilidad de aplicación:** Robustez de la solución, tolerancia a condiciones adversas y capacidad para realizar la dosificación correcta sin fallos.

Con base en estos criterios de evaluación, se construyó una matriz comparativa de las combinaciones de conceptos propuestas. Para esto, se definió una de las alternativas como punto de referencia contra el cual se evaluó el resto. A cada uno de los conceptos se le asignó un “+” si presentó un desempeño superior al de la referencia en ese criterio, un “0” si se consideró equivalente o un “-” si se consideró inferior. La matriz resultante del proceso se observa en la tabla 3.6.

**Tabla 3.6:** Matriz de filtrado de conceptos.

Criterios de selección	Concepto 1	Concepto 2	Concepto 3 (Ref.)	Concepto 4	Concepto 5
Precisión de aplicación	+	+	0	+	+
Dificultad de implementación	0	-	0	0	-
Capacidad de mantenimiento	0	-	0	0	-
Capacidad de crecimiento	0	-	0	0	-

*Continúa en la siguiente página*

Tabla 3.6 – Continuación de la página anterior

Criterios de selección	Concepto 1	Concepto 2	Concepto 3 (Ref.)	Concepto 4	Concepto 5
Tiempo de aplicación del aditivo	+	+	0	+	+
Tamaño	-	-	0	0	-
Confiabilidad de aplicación	+	-	0	+	-
Suma +	3	2	0	3	2
Suma 0	4	0	7	3	0
Suma -	1	5	0	0	5
Evaluación neta	2	-3	0	3	-3
Lugar	2	4	3	1	5
¿Continuar?	Sí	No	Sí	Sí	No

Con base en los resultados obtenidos, se seleccionaron las combinaciones que avanzarán a la siguiente fase del proceso de diseño para su evaluación detallada (Sí).

### 3.4.2 Selección del concepto a seguir

Tras el filtrado de conceptos, se selecciona la combinación más adecuada para cumplir con los objetivos del sistema. Esta selección se realiza mediante un método de evaluación basado en los criterios de selección previamente definidos. A cada concepto se le asigna un peso porcentual de acuerdo con su relevancia en el contexto del sistema dosificador. De este modo, los criterios asociados a necesidades de mayor importancia reciben un porcentaje más elevado, asegurando que la alternativa seleccionada cumpla con los requerimientos técnicos y operativos de la planta.

Para esta selección, se definió una combinación como referencia y se comparó con las demás alternativas utilizando la siguiente escala:

1. Es considerablemente inferior que la referencia.
2. Es ligeramente inferior que la referencia.
3. Es equivalente a la referencia.

4. Es ligeramente superior que la referencia.
5. Es considerablemente superior que la referencia.

La Tabla 3.7 presenta la asignación de pesos porcentuales a los criterios de selección. Para evitar la subjetividad, siguiendo la metodología, se asignó un valor entre 1 y 5 a cada criterio, siendo 5 el de mayor relevancia. Posteriormente, estos valores se ponderan para obtener el peso relativo de cada criterio en la selección final, permitiendo una comparación objetiva y la elección del concepto que mejor satisfaga las condiciones requeridas por el proyecto.

En esta segunda evaluación, se establecieron seis criterios de evaluación relacionados con las necesidades del cliente basados en la jerarquización definida en la sección 3.2.2; estos reflejan los aspectos críticos del sistema, tanto desde la perspectiva operativa como funcional. Estos criterios se describen a continuación:

- La precisión de aplicación del aditivo responde a la necesidad de lograr una dosificación ajustada a la formulación correspondiente y evitar errores de dosificación (necesidades 3 y 4).
- El grado de automatización y autonomía del sistema se refiere a la eliminación de la intervención del operador y la dosificación activa al detectar la entrada del nuevo lote de goma (necesidades 1 y 2).
- La compatibilidad con las condiciones de operación contempla los aspectos físicos asociados a la estabilidad del aditivo, por ejemplo, la exposición al sol, la temperatura ambiente y la sensibilidad química (necesidades 6, 9 y 12).
- El criterio de seguridad y protección del operador responde a la necesidad de evitar el contacto directo con el adhesivo, ya que es corrosivo (necesidad 13).
- La facilidad de mantenimiento e integración consiste en establecer un diseño que sea compatible con el diseño actual y además que su acceso para el mantenimiento y limpieza sea fácil (necesidades 10 y 14).
- Finalmente, la capacidad de acción ante eventuales paros en la línea de distribución busca evitar desperdicios de aditivo y goma, además de la aplicación incorrecta de goma en momentos donde no hay consumo activo (necesidades 7 y 8).

**Tabla 3.7:** Matriz de evaluación de conceptos

Criterios de selección	Peso	Concepto 1		Concepto 3		Concepto 4	
		Calificación	Ponderado	Calificación	Ponderado	Calificación	Ponderado
Precisión de aplicación del aditivo	40%	4	1,6	3,5	1,4	5	2,0
Grado de automatización y autonomía del sistema	20%	4	0,8	5	1,0	4,5	0,9
Compatibilidad con condiciones de operación	10%	3	0,3	5	0,5	5	0,5
Seguridad y protección del operador	15%	4	0,6	4	0,6	3,5	0,525
Facilidad de mantenimiento e integración al sistema existente	10%	3,5	0,35	2,5	0,25	5	0,5
Capacidad de reacción frente a interrupciones o paros de línea	5%	5	0,25	5	0,25	5	0,25
<b>Total</b>			<b>3,9</b>		<b>4,0</b>		<b>4,475</b>
<b>Lugar</b>			3		2		1
<b>Continuar</b>			No		No		Desarrollar

A partir de estos resultados, se determina que la combinación ganadora corresponde a:

- **Bloque 1 – Admisión de aditivo:** Gravedad controlada con válvula y sensor de nivel. Nótese que para ingresar el aditivo a este tanque se usará una bomba neumática para mover el fluido.
- **Bloque 2 – Admisión de goma:** Sensor de nivel alto en el tanque de mezcla.
- **Bloque 3 – Control:** PLC industrial.
- **Bloque 4 – Señales de control:** Activación de válvulas neumáticas mediante electroválvulas.
- **Bloque 5 – Mezclador:** Mezcla por sistema existente.

### 3.5 Pruebas de validación de conceptos

Para comprobar el cumplimiento de los requerimientos establecidos para cada función del sistema, se define un plan de validación estructurado por bloques. Este enfoque permite verificar la funcionalidad de la solución propuesta y la viabilidad de su implementación en condiciones reales de operación.

La evaluación independiente de cada uno de los cinco bloques funcionales asegura el cumplimiento de las métricas y necesidades asociadas. Este enfoque facilita la detección de posibles fallos, promueve mejoras iterativas y simplifica los procesos de ajuste o rediseño. Las pruebas se alinean con las métricas establecidas en la sección 3.2.1 y se diseñan para ser ejecutables con los recursos disponibles en la planta, garantizando que el análisis sea cuantificable y reproducible.

### 3.5.1 Prueba 1: Evaluación del sistema de activación y precisión de dosificación de aditivo.

En esta prueba, se busca evaluar la capacidad del subsistema de admisión de aditivo para dosificar una cantidad precisa de producto; además, se valida que la dosificación se active únicamente al recibir la señal de control correspondiente desde la PLC.

La prueba consiste en la colocación del sistema final y su conexión a la señal eléctrica generada por los sensores, con esto, ver cómo se comporta el sistema y, una vez completada la secuencia de forma adecuada, validar la posición de la aplicación del aditivo.

Se realizan al menos 100 ciclos de prueba, con un volumen objetivo definido (Volumen de 1150 mL/ciclo). Se mide el volumen descargado tras cada ciclo y se calcula la variación del volumen dosificado entre ciclos, así como el tiempo de descarga del aditivo al sistema.

#### Métricas evaluadas:

- **Métrica 1:** El sistema debe dosificar el aditivo sin intervención del operador.(Sistema completamente automático)
- **Métrica 2:** Activación automática del sistema por detección de lote (Activación del sistema).
- **Métrica 3:** Precisión de dosificación de aditivo (desviación estándar del volumen dosificado).
- **Métrica 4:** Prevención de sub/sobredosificación (tolerancia al error por ciclo).
- **Métrica 5:** La mezcla del aditivo con la goma debe ser homogénea e instantánea.(Tiempo de descarga)

### 3.5.2 Prueba 2: Validación de admisión de goma en integración con sistema de control

Durante esta prueba, se evalúa la capacidad del subsistema de admisión de goma para recibir correctamente el nuevo lote de producto y responder adecuadamente a las señales del sistema de control. Tomando en cuenta que el sistema de admisión actualmente se encuentra implementado en la cocina de goma, el objetivo de esta prueba es validar su compatibilidad e integración con el sistema propuesto.

Durante esta prueba se inhabilita el sistema original de admisión de goma, esto con el fin de conectar la señal de admisión generada por la PLC y, de esta forma, validar que las señales de admisión, en efecto, trabajan como debe en el sistema nuevo, siempre manteniendo la accesibilidad para regresar al sistema original si la prueba falla. Además, se verifica que la activación ocurra solo cuando se da la señal, asegurando de esta forma que no haya flujo de goma durante paros o fallos.

Para esta prueba se llevan a cabo al menos 100 ciclos de activación para asegurar la consistencia; además, se monitorean las señales de respuesta y el correcto funcionamiento del sistema ya existente bajo la nueva lógica de control.

#### Métricas evaluadas:

- **Métrica 2:** Activación automática del sistema por detección de lote.
- **Métrica 7:** Garantía de que la goma sin aditivo no reciba dosis cuando no se consuma.
- **Métrica 8:** Prevención del desperdicio de aditivo tras paros o ciclos no utilizados.

### 3.5.3 Prueba 2B: Verificación de compatibilidad física y funcional de admisión de goma con el sistema automatizado.

Mediante esta prueba, se valida la compatibilidad del subsistema de admisión de goma con los nuevos componentes del sistema automatizado a nivel físico y funcional.

Para esto se verifica que:

- La conexión física entre ambos sistemas se realice sin obstrucciones ni modificaciones estructurales mayores.
- La ubicación de los sensores permita detectar correctamente la llegada del nuevo lote.
- Las condiciones de operación (volumen) sean compatibles con los requerimientos del sistema de dosificación y mezcla.

La prueba consiste en realizar una validación integral en sitio utilizando el aditivo real, con el objetivo de observar las características de descarga bajo condiciones operativas reales. Este procedimiento permite identificar posibles errores de ubicación y configuración, y, si es necesario, realizar las modificaciones estructurales o eléctricas pertinentes.

#### **Métricas complementarias evaluadas:**

- **Métrica 6:** El sistema debe asegurar que el aditivo no permanezca estancado ni expuesto al sol.
- **Métrica 10:** Facilidad de mantenimiento y limpieza del sistema.
- **Métrica 12:** El diseño debe considerar las características físicas y químicas del aditivo.
- **Métrica 14:** Compatibilidad del sistema con tanques y proceso actual.

### **3.5.4 Prueba 3: Validación del subsistema de control**

El propósito de esta prueba es la evaluación del desempeño y la viabilidad de los distintos componentes del sistema de control, tomando en cuenta que se implementará el control mediante un PLC. El objetivo es verificar que el sistema de control pueda gestionar las entradas y salidas necesarias, además de evaluar la integración con el resto de los subsistemas.

Para esto, se realiza una prueba de concepto utilizando un PLC compatible con Connected Components Workbench (CCW). Las señales de entrada (sensores de nivel) se visualizan en el software y se valida que las salidas hacia las válvulas, bombas y otros actuadores se ejecuten correctamente según la lógica programada.

La validación se realiza en dos fases:

1. **Validación de lógica de control:** Se programa el PLC con la secuencia de funcionamiento deseada, incluyendo la activación de dosificación y verificación de sensores.
2. **Simulación de señales físicas:** Se emplean señales físicas generadas por los sensores para verificar la respuesta del PLC en cada uno de los escenarios de operación previstos.

#### Métricas evaluadas:

- **Métrica 2:** Activación automática del sistema por detección de lote.
- **Métrica 7:** Debe garantizarse que la goma sin aditivo no reciba dosis cuando no sea necesario.
- **Métrica 8:** El sistema debe prevenir el desperdicio de aditivo tras paros o ciclos no utilizados.
- **Métrica 10:** Facilidad de mantenimiento y limpieza del sistema.
- **Métrica 11:** Trazabilidad del número de ciclos de dosificación.

### 3.6 Determinación del tamaño de muestra para estimar el coeficiente de variación.

Con el fin de garantizar que la determinación del coeficiente de variación (CV) de la viscosidad sea estadísticamente confiable, se determinó el número de observaciones necesarias para obtener un intervalo de confianza del 95 % con un error relativo máximo admisible del 15 % respecto al valor esperado  $CV_{esp} = 0.23$ .

#### 3.6.1 Fundamento teórico.

Según Walpole et al. [62], la varianza muestral  $s^2$  de una muestra aleatoria extraída de una población normal con varianza  $\sigma^2$  se distribuye como una variable  $\chi^2$ , lo que permite construir intervalos de confianza para  $\sigma^2$  y, por extensión, para cualquier medida de dispersión derivada de ella. A partir de esta base, y considerando el desarrollo del error estándar del estimador del CV, puede expresarse la relación aproximada:

$$SE(CV) \approx CV \sqrt{\frac{1 + 2CV^2}{2n}}, \quad (3.1)$$

donde  $n$  es el tamaño de muestra. Si se exige que el semiancho relativo del intervalo de confianza al  $1 - \alpha$  no exceda un valor  $E_r$ , la condición se transforma en:

$$\frac{z_{1-\alpha/2} SE(CV)}{CV} \leq E_r, \quad (3.2)$$

y despejando  $n$ :

$$n = \frac{z_{1-\alpha/2}^2 (1 + 2CV_{esp}^2)}{2 E_r^2}. \quad (3.3)$$

### Sustitución de valores.

Para un nivel de confianza del 95 % ( $z_{0.975} = 1.96$ ), con  $CV_{esp} = 0.23$  y  $E_r = 0.15$ :

$$\begin{aligned} n &= \frac{(1.96)^2 (1 + 2 \times 0.23^2)}{2 \times (0.15)^2} \\ &= \frac{3.8416 \times (1 + 0.1058)}{0.045} \\ &= \frac{4.247}{0.045} \approx 94.4. \end{aligned}$$

Por lo tanto, se requiere un tamaño de muestra de al menos:

$$\boxed{n = 95 \text{ mediciones}}$$

### Interpretación.

Con 95 mediciones de viscosidad independientes se puede estimar el coeficiente de variación con una confianza del 95 % y un error relativo máximo del 15 %. Este tamaño de muestra es adecuado para validar experimentalmente la mejora en la estabilidad del proceso tras la implementación del sistema de dosificación automático.

### 3.7 Determinación del tamaño de muestra para la estimación del promedio de volumen y tiempo de descarga.

Con el fin de validar el volumen medido en el sistema dosificador con un nivel de confianza del 95 %, se calculó el número mínimo de mediciones necesarias para garantizar que el error en la estimación del promedio sea aceptablemente pequeño.

#### 3.7.1 Fundamento teórico.

De acuerdo con Walpole et al. [62], el tamaño de muestra necesario para estimar una media poblacional  $\mu$  con un nivel de confianza  $1 - \alpha$  y un margen de error absoluto  $e$  está dado por:

$$n = \left( \frac{z_{1-\alpha/2} \sigma}{e} \right)^2, \quad (3.4)$$

donde  $z_{1-\alpha/2}$  es el valor crítico de la distribución normal estándar correspondiente al nivel de confianza, y  $\sigma$  representa la desviación estándar de la variable bajo estudio.

Si el margen de error se expresa en forma *relativa* respecto de la media ( $e = r\mu$ ) y se sustituye  $\sigma = CV \cdot \mu$ , la expresión se convierte en:

$$n = \left( \frac{z_{1-\alpha/2} CV}{r} \right)^2. \quad (3.5)$$

#### 3.7.2 Sustitución de valores.

Para obtener una estimación precisa, se adopta un coeficiente de variación esperado de  $CV = 0.05$  (5 %), una confianza del 95 % ( $z_{0.975} = 1.96$ ) y un error relativo máximo admisible del 1 % ( $r = 0.01$ ). Sustituyendo en la ecuación (3.5):

$$\begin{aligned}n &= \left( \frac{1.96 \times 0.05}{0.01} \right)^2 \\ &= \left( \frac{0.098}{0.01} \right)^2 \\ &= 9.8^2 \approx 96.04.\end{aligned}$$

Por tanto, se realizarán al menos:

$$\boxed{n = 97 \text{ mediciones}}.$$

### 3.7.3 Interpretación.

Con 97 observaciones independientes del volumen, se obtiene una estimación de la media con un nivel de confianza del 95 % y un error relativo máximo del 1 %. El mismo número de datos ( $n = 97$ ) se utilizará también para la validación de las **muestras volumétricas** y las **mediciones de tiempo de descarga**, asegurando una coherencia estadística entre ambos ensayos y un nivel de confiabilidad homogéneo en la evaluación del desempeño del sistema dosificador.

# Capítulo 4

## Propuesta de diseño

Este capítulo presenta la propuesta de diseño basada en la integración de soluciones óptimas identificadas previamente para el sistema automatizado de dosificación de aditivo en la formulación de goma. La propuesta incluye el diagnóstico del proceso actual, la selección de los componentes necesarios para la implementación y su integración en el entorno operativo de la cocina de goma en la planta de cartón corrugado. Además, se describe la solución de automatización, que abarca los elementos mecánicos, neumáticos, sensores y el control lógico programable (PLC), junto con la estructura de interconexión eléctrica requerida para su implementación.

### 4.1 Diagnóstico del proceso actual

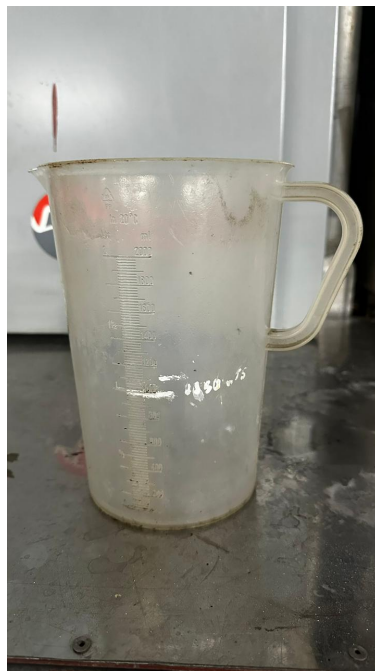
#### 4.1.1 Método actual de aplicación del aditivo

En la planta de cartón corrugado donde se implementará la solución, la adición de aditivos se realiza de forma manual, lo que presenta limitaciones en precisión, seguridad y repetibilidad. La formulación adecuada del adhesivo depende de la correcta adición del aditivo, ya que su aplicación precisa garantiza las propiedades reológicas, la viscosidad, el comportamiento térmico y el desempeño del pegado final.

El operador asignado a la cocina de goma es responsable de la aplicación del aditivo, además de tareas simultáneas como la alimentación de la máquina con almidón y otros químicos, y

la supervisión del funcionamiento del sistema. Esta multiplicidad de funciones genera una sobrecarga operativa, lo que puede disminuir la atención dedicada a la dosificación precisa y oportuna del aditivo.

En el método actual, la aplicación inicia con la extracción del aditivo desde una tanqueta de almacenamiento ubicada a nivel de piso. El operador debe inclinarse para manipular una válvula de paso situada en una posición poco ergonómica, controlando la válvula con una mano mientras sostiene con la otra un recipiente tipo pichel, como se muestra en la figura 4.1, en el que recoge una cantidad aproximada de producto necesaria para un lote de goma. Este recipiente presenta una marca manual en el nivel de 1,150 L; sin embargo, esta referencia carece de trazabilidad metrológica y su repetibilidad depende exclusivamente de la percepción del operador y de factores como el ángulo de inclinación del recipiente durante el llenado, sin que se realicen ajustes según la medida servida.



**Figura 4.1:** Recipiente utilizado para la dosificación del aditivo.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez lleno el recipiente, el operador espera la llegada de un nuevo lote de goma, lo cual ocurre aproximadamente cada cinco minutos y carece de señalización automatizada. La detección del nuevo ingreso se basa en el sonido, la vibración o la experiencia previa del operador. Posteriormente, el contenido del recipiente se vierte directamente en el punto de mezcla donde circula la goma caliente, como se muestra en la figura 4.2. No existe una

etapa intermedia de premezcla ni agitación específica; la homogeneidad de la mezcla depende únicamente del flujo natural de la línea de distribución.



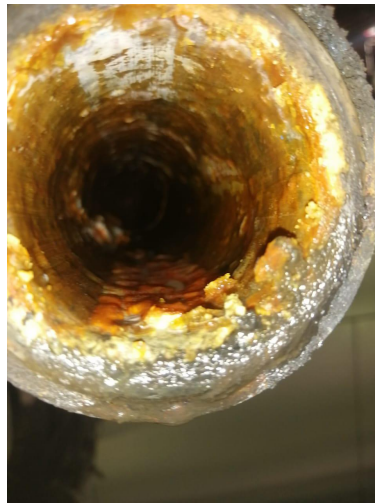
**Figura 4.2:** Descarga del aditivo en la línea de mezcla.

Fuente: Elaboración propia.

Esta tarea se realiza aproximadamente 12 veces por hora. La repetitividad de la actividad, junto con las deficientes condiciones ergonómicas, ha generado diversas consecuencias identificadas por el personal de mantenimiento y calidad: errores por exceso o déficit de aditivo, derrames accidentales, postergación de dosis durante los descansos y formación de incrustaciones sólidas en las tuberías de salida. Estas incrustaciones dificultan el paso del adhesivo, alteran su viscosidad efectiva, afectan el caudal y reducen la calidad del pegado final, como se observa en la figura 4.3.

El procedimiento actual carece de estandarización y no existe documentación formal interna que describa la correcta aplicación del aditivo, a pesar de su impacto en la consistencia del producto final. La transmisión del procedimiento es oral y se aprende de manera empírica, lo que dificulta la implementación de mejoras y la evaluación del proceso a través de auditorías de calidad.

En términos de seguridad, la manipulación del aditivo, que es corrosivo, requiere el uso de equipo de protección personal, como guantes y lentes protectores. Sin embargo, estas medidas no eliminan completamente el riesgo, especialmente ante derrames inesperados durante



**Figura 4.3:** Obstrucción parcial en tubería por coagulación de goma.

Fuente: Elaboración propia.

la manipulación.

Asimismo, se ha observado que, en momentos críticos como los descansos, algunos operadores sobredosifican deliberadamente el producto para cumplir con la dosificación y evitar ausencias. Esta práctica incrementa la variabilidad del proceso y afecta negativamente tanto la calidad del adhesivo como el consumo eficiente del aditivo.



**Figura 4.4:** Posición de la válvula en la tanqueta de aditivo.

Fuente: Elaboración propia.

El método manual actual presenta deficiencias en ergonomía, seguridad, precisión, repetibilidad y trazabilidad, lo que respalda la necesidad de automatizar esta etapa mediante una solución robusta y confiable.

#### **4.1.2 Estructura actual del sistema de distribución de goma**

El sistema de distribución de goma actual de la planta está compuesto de tuberías, bombas, tanques y equipos auxiliares, y su finalidad es garantizar el suministro continuo, homogéneo y eficiente de adhesivo desde la cocina de goma hasta los diferentes aplicadores del área de corrugado. Este sistema debe asegurar la operación constante de las líneas de producción, esto mediante el flujo constante de adhesivo, la mezcla eficiente de aditivos, la recirculación del material no utilizado y la posibilidad de realizar mantenimientos que no generen interrupciones mayores.

##### **Red general de distribución**

La red general de distribución está compuesta por una línea de suministro y una de retorno. Ambas líneas recorren la planta mediante tuberías aéreas de hierro galvanizado de 2 pulgadas de diámetro. En la zona de la cocina de goma, estas tuberías llegan a bombas de transferencia que se encuentran parcialmente por debajo del nivel del piso. La línea de suministro lleva goma desde la cocina hasta los tres puntos de aplicación: dos flautas corrugadoras y una doble engomadora. Por otro lado, la línea de retorno recolecta el exceso de adhesivo de las máquinas y lo lleva de nuevo a la cocina, donde es posible reincorporarlo al sistema, todo esto gracias al tanque dosificador.

Un aspecto crítico del diseño de la red de tuberías es la existencia de un sistema duplicado, con circuitos paralelos para el suministro y el retorno. Esta redundancia responde a la necesidad operativa de enfrentar obstrucciones internas causadas por residuos secos o parcialmente gelificados de goma, permitiendo realizar limpiezas, mantenimientos o reparaciones sin interrumpir la producción. Uno de los objetivos de este proyecto es reducir la frecuencia de estas intervenciones mediante una dosificación más precisa y homogénea del aditivo.

En cuanto al sistema de impulsión del adhesivo, este está conformado principalmente por

bombas de engranajes marca Rupper, las cuales permiten movilizar la goma desde el tanque dosificador hasta los distintos puntos de aplicación en la planta.

Las líneas de producción se alimentan directamente de tres líneas a lo largo de la red de distribución: dos flautas corrugadoras y una doble engomadora. Cada flauta cuenta con un sistema de retorno, igual mediante bombas de engranajes que devuelven el excedente de goma hacia el dosificador. En cuanto a la doble engomadora, esta emplea una bomba de diafragma neumática para su retorno, diseñada específicamente para las condiciones de esta línea.

### **El dosificador: punto de ingreso y retorno**

El principal componente del sistema es un tanque conocido como dosificador. Este está ubicado en la cocina de goma y cumple tres funciones fundamentales:

1. Recibe el lote nuevo de goma formulado en la cocina de goma.
2. Recibe el retorno de goma excedente que proviene de las líneas de producción.
3. Además, este es el punto donde el operador vierte el aditivo.

Este tanque es de tipo abierto con tapa abatible, lo que permite el fácil acceso para la aplicación del aditivo (ver Figura 4.2). La goma fluye constantemente a través del dosificador y por la geometría del tanque y el flujo entrante (nuevo y retornado) genera un efecto de borboteo que contribuye a la mezcla, mientras que la salida inferior del tanque está equipada con una reducción y filtro que colaboran con la homogenización antes de enviar la mezcla a la red de suministro. Como el flujo nunca se detiene, la planta cuenta con dos tanques adicionales de almacenamiento equipados con agitadores, que permiten conservar la mezcla activa durante los paros de producción.

### **El retorno en la doble engomadora**

Es importante tomar en cuenta que el tanque ubicado junto a la doble engomadora no forma parte del punto principal de retorno del sistema, ya que este actúa simplemente como un colector local del excedente de goma de esa máquina en específico. De todas formas,

el adhesivo es impulsado desde este tanque mediante bombas de diafragma hacia la red de retorno y hacia el dosificador. En este sentido, el verdadero punto de retorno es el dosificador mismo, sitio donde confluyen todas las corrientes del sistema: nueva, reciclada y el aditivo. Este tanque auxiliar de la doble engomadora tiene otro rol importante, ya que es el punto donde se realizan las mediciones de viscosidad del adhesivo. Estas pruebas miden y representan la calidad de la mezcla final en circulación, tras la incorporación y homogeneización del aditivo, distribuido en el sistema. Este tanque se muestra en la figura 4.5.



**Figura 4.5:** Tanque de muestreo.

Fuente: Elaboración propia.

### 4.1.3 Medidas de viscosidad (histórico)

La viscosidad del adhesivo formulado en la cocina de goma es uno de los parámetros más relevantes para asegurar su posterior desempeño en las líneas de producción. Actualmente, en la planta se realiza la medición de la viscosidad cinemática; para esto se utiliza una copa de flujo conocida como “Copa Love”, del distribuidor de aditivos Harper Love. Esta copa opera bajo el principio de vaciado por gravedad, donde el tiempo de flujo del adhesivo se cronometra desde el llenado hasta el vaciado completo de referencia, delimitado por una varilla interna.

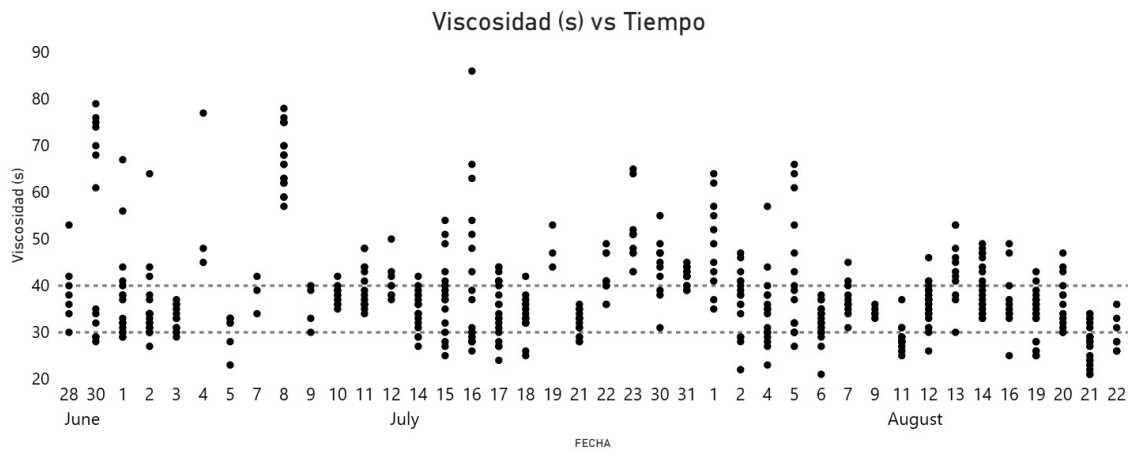
La medición se realiza en el tanque de retorno de la doble engomadora, donde el adhesivo ya se encuentra completamente mezclado. Este tanque recibe el adhesivo sobrante de la línea y lo estabiliza antes de su reintroducción a la red. En este punto, la mezcla se considera representativa del comportamiento global del sistema, por lo que se ha establecido como el sitio estándar para el muestreo. La medición se efectúa directamente tras la limpieza previa de la copa para evitar contaminación cruzada.

El muestreo se realiza con una frecuencia horaria y es ejecutado por el operador responsable de la cocina de goma como parte de sus tareas rutinarias de supervisión. No existe un protocolo documentado o estandarizado para esta medición; sin embargo, se ha transmitido de manera empírica que la copa debe sumergirse hasta alcanzar su llenado completo y en el momento en que el nivel alcanza el borde superior, debe iniciarse el cronometraje. El tiempo de vaciado se detiene cuando el adhesivo deja de fluir desde el orificio de descarga, marcado por la varilla de referencia de la copa. Los resultados se registran manualmente en una bitácora física como parte del control interno operativo.

El valor aceptable para esta medición debe oscilar entre 30 y 40 segundos. Este rango fue establecido en conjunto con el proveedor de aditivos, con base en el comportamiento óptimo del adhesivo en la línea de producción. Cuando se han registrado valores fuera del rango aceptable, se ha evidenciado una mayor propensión a la formación de incrustaciones en las tuberías de distribución, lo que obstruye el flujo de la goma y disminuye el diámetro útil de la tubería. Esto aumenta el esfuerzo de bombeo; además, disminuye la calidad del pegado en las cajas producidas.

El análisis histórico de los valores de viscosidad revela una correlación entre la variabilidad extrema fuera de rango y los errores en la aplicación manual del aditivo. Cuando se registra una dosificación incorrecta por parte del operador, ya sea por exceso o defecto, se observan desviaciones abruptas en la viscosidad de la mezcla. La dosificación manual genera una dependencia de la pericia del operador, lo que se traduce en una variabilidad no controlada. La figura 4.6 presenta un gráfico ilustrativo de la viscosidad medida en distintos momentos, donde se evidencian múltiples eventos fuera del rango óptimo.

Aunque la planta dispone de un mecanismo básico para monitorear la viscosidad, estos datos carecen de valor operativo debido a las limitaciones de precisión del método actual, la dependencia del juicio del operador y la ausencia de una dosificación controlada. Como



**Figura 4.6:** Evolución de la viscosidad medida vs. rango aceptable.

Fuente: Elaboración propia.

resultado, las mediciones no son confiables ni repetibles. Si bien las mediciones reflejan el escenario actual, no es posible aplicar una corrección a la dosificación manual a partir de estos datos. Por lo tanto, se justifica la implementación de una solución automatizada que permita estabilizar la viscosidad del adhesivo dentro del rango definido, facilitando la corrección de datos anómalos mediante calibración.

## 4.2 Selección de componentes

### 4.2.1 Selección de materiales

El aditivo que es necesario dosificar corresponde al producto Multibond LA<sup>TM</sup>. Este aditivo es un líquido de color rojo, compuesto por una mezcla de resinas termoactivas y realizadores de desempeño; su formulación está orientada exclusivamente a procesos industriales de engomado en líneas corrugadoras.

En cuanto a sus propiedades físicas, el fluido presenta una viscosidad cinemática de aproximadamente 12,383 cSt (centistokes) a temperatura ambiente y se comporta como un líquido dispersable en agua. Su porcentaje de sólidos es de entre 42 y 48 %; su pH se encuentra en un rango de 5.0 a 9.0, lo que implica una acidez leve que puede generar un efecto corrosivo en materiales metálicos susceptibles.[63]

Este aditivo no es inflamable y no representa un riesgo de explosión, pero requiere pre-

cauciones especiales de manejo y almacenamiento. Este debe almacenarse en el rango de temperatura de 0 °C a 32 °C y debe evitarse el contacto directo con la piel y los ojos, debido a su potencial irritante.[63] En cuanto a su estabilidad química, esta puede verse comprometida si entra en contacto con materiales altamente alcalinos, ácidos fuertes u oxidantes, lo que restringe aún más la selección de materiales compatibles para su transporte y almacenamiento.[63]

Con base en estas propiedades, se estableció una serie de criterios para seleccionar los materiales apropiados en las partes del sistema que estarán en contacto con el aditivo. Estos criterios son los siguientes:

- **Compatibilidad química:** El material debe ser inerte ante soluciones acuosas con pH moderadamente ácido y con contenido de sólidos, para evitar reacciones que puedan comprometer la seguridad del sistema o deteriorar los componentes.
- **Resistencia estructural:** El tanque que va a contener el aditivo debe ser capaz de soportar no solo la presión estática del fluido, sino también el peso adicional de los componentes externos acoplados, tales como válvulas, sensores y soportes. Por tanto, la estructura debe estar construida en un material metálico resistente.
- **Facilidad de limpieza y mantenimiento:** Se prioriza el uso de materiales lisos, de bajo coeficiente de adherencia y resistentes a agentes de limpieza industriales.
- **Disponibilidad en el entorno industrial actual:** El sistema debe emplear materiales y uniones compatibles con las prácticas actuales de la planta, donde predomina el uso de conexiones roscadas.

Actualmente, los tanques utilizados en la cocina de goma y en la zona de retorno son fabricados en acero inoxidable, material escogido debido a su elevada resistencia mecánica, buena tolerancia a la corrosión y facilidad de limpieza. Este material ha estado en contacto directo con el aditivo en condiciones de operación continua y ha demostrado ser funcional.

Por otro lado, la red de tuberías que se emplea para la conducción de la goma por el sistema, está fabricada en hierro galvanizado, este se ha comprobado que se oxida en contacto con el aditivo, por este motivo, las manipulaciones actuales del Multibond LA™ se realizan

mediante mangueras plásticas y tubos de PVC, que han mostrado una mayor resistencia química al producto.

Con base en estas observaciones, se ha determinado que el tanque contenedor del aditivo será completamente construido en acero inoxidable, con un cuerpo estructural metálico capaz de soportar tanto el peso del líquido como el de la válvula automatizada instalada en su parte inferior. Para el transporte del aditivo desde el tanque hasta el punto de almacenamiento o alimentación, se utilizarán tuberías de PVC. Esta decisión técnica se fundamenta en dos aspectos: el PVC posee resistencia química ante el contacto con el aditivo y el peso del fluido en esta sección del sistema es menor y no requiere una estructura metálica, lo que permite una implementación más económica y flexible.

La selección de acero inoxidable sobre otros materiales como el acero al carbono, aluminio o latón se fundamenta principalmente en dos razones: la estabilidad química y la estabilidad superficial. Metales como el acero al carbono presentan oxidación espontánea al entrar en contacto con el aditivo, generando productos de corrosión (herrumbre) que pueden desprender partículas y alterar el producto. El aluminio, aunque resistente a la corrosión en agua, es vulnerable en medios ligeramente ácidos, y dado que el aditivo tiene un pH entre 5 y 9, se acelera el ataque superficial, generando picaduras. El latón es propenso a la deszincificación selectiva por presencia de humedad, lo que debilita mecánicamente el material. Por lo tanto, el uso de metales susceptibles a la oxidación comprometería tanto la higiene del sistema como la vida útil del tanque y de los accesorios.

En cuanto a los aceros inoxidables, no todos presentan las mismas características de resistencia química, especialmente al estar en contacto con el aditivo en un ambiente húmedo y con presencia de aire y polvo. En este contexto, se selecciona entre el acero inoxidable 304 y el 316, que no son equivalentes. El 304 ofrece buena resistencia general, mientras que el 316 incorpora molibdeno (usualmente entre 2 y 3%), lo que incrementa la resistencia química frente a la corrosión y la picadura. Normativamente, la composición química certificable para estos aceros está especificada en la norma ASTM A240/A240M.[65]

En síntesis, la combinación de acero inoxidable para las estructuras principales y PVC para las líneas de transporte ofrece una solución equilibrada en términos de resistencia, compatibilidad química y facilidad de mantenimiento, en concordancia con los requerimientos específicos del proyecto.

## 4.2.2 Tubería

### **Especificaciones técnicas:**

El sistema de transporte del aditivo utilizará tubería de PVC de  $\frac{1}{2}$  pulgada de diámetro nominal. Esta elección responde a las condiciones de operación, que incluyen el manejo de un fluido de baja viscosidad (12,383 cSt), sin presión elevada ni requerimientos térmicos especiales. El flujo será impulsado por una bomba de bajo caudal y la tubería se instalará de forma aérea, con trayectos cortos entre el tanque de almacenamiento y el punto de aplicación en el dosificador.

### **Justificación:**

El PVC presenta compatibilidad química con el aditivo de base acuosa, que tiene un pH entre 5 y 9, según la hoja de seguridad del fabricante [63]. Su resistencia a la abrasión, bajo peso y facilidad de montaje lo hacen adecuado para instalaciones sujetas a mantenimiento frecuente, conforme a la norma ASTM D 1785[64]. A diferencia del hierro galvanizado, el PVC no produce reacciones adversas ni afecta la calidad del producto. Dado que el sistema no opera bajo presión ni temperatura extremas, no se justifica el uso de materiales de mayor costo como el acero inoxidable para la tubería. El acero inoxidable se empleará únicamente en la estructura del tanque de almacenamiento, ya que debe soportar la carga mecánica generada por el peso de la válvula de salida.

La combinación de PVC para la conducción y acero inoxidable en la estructura de soporte permite optimizar los costos sin comprometer la confiabilidad ni la durabilidad del sistema. La tubería de  $\frac{1}{2}$  pulgada posibilita un control preciso del volumen transportado, reduce el tiempo de purga y facilita la limpieza. El diámetro reducido favorece la integración del sistema en la planta, evita interferencias con la red existente y simplifica el mantenimiento o la sustitución de tramos dañados.

### **Recorrido de tubería y elección del diámetro nominal.**

La página 6 del Apéndice A (planos mecánicos), muestra el recorrido completo de la tubería del aditivo, desde la salida del tanque hasta la entrada y descarga asociada a la bomba de diafragma del circuito. Este diagrama proporciona una confirmación visual de la continuidad del trazado y de los puntos clave de conexión y sirve como base para definir y documentar

el diámetro nominal final del sistema.

En este proyecto, la línea se estandarizó en PVC de 1/2 pulgada, decisión basada en criterios funcionales y logísticos en lugar de cálculos hidráulicos restrictivos. Se priorizó la disponibilidad de materiales y la facilidad de mantenimiento en planta. Las condiciones que inspiraron esta decisión corresponden a:

- Las bombas de diafragma disponibles y utilizadas en la planta emplean puertos de 1/2 pulgada, por lo que mantener este diámetro elimina la necesidad de accesorios reductores y reduce el riesgo de fugas.
- La mayoría de los accesorios comerciales disponibles en la planta, incluidos codos, uniones, tees, válvulas, conectores rápidos y purgas, son de 1/2 pulgada, lo que facilita la reposición y el montaje del sistema.
- El volumen de aditivo requerido por ciclo no justifica el uso de tuberías de mayor diámetro. El aspecto fundamental es garantizar la continuidad del trazado, en lugar de aumentar el caudal.

### 4.2.3 Bomba

#### **Especificaciones técnicas:**

Para impulsar el aditivo desde el tanque de almacenamiento hasta el dosificador, se seleccionó una bomba de desplazamiento positivo de diafragma neumática. Este tipo de bomba es adecuado para el manejo de líquidos de viscosidad moderada y se ajusta a las condiciones de operación de la planta. El accionamiento por aire comprimido utiliza la infraestructura existente y elimina la necesidad de alimentación eléctrica directa en áreas húmedas.

#### **Justificación:**

La selección de una bomba neumática de diafragma se fundamenta en ventajas operativas, funcionales y de compatibilidad con el entorno de la planta. Estas bombas permiten una dosificación controlada y continua, lo cual es esencial para procesos que requieren precisión, repetibilidad y reducción de la variabilidad por intervención humana. El diseño interno, sin elementos giratorios, preserva la estructura del aditivo durante el transporte, tolera

partículas suspendidas y permite la operación en seco sin riesgo de daño, lo que incrementa la confiabilidad.

La amplia adopción de esta tecnología en la planta representa un factor determinante. Las bombas neumáticas de diafragma se emplean frecuentemente en las imprentas para el manejo de tintas, aceites y pequeñas cantidades de goma, lo que garantiza la disponibilidad de modelos, tamaños y repuestos en el almacén de mantenimiento. Además, el personal técnico cuenta con experiencia en su mantenimiento, desarme, limpieza y reparación, lo que reduce la curva de aprendizaje y los tiempos de respuesta ante eventualidades.

Desde la perspectiva del control automatizado, este tipo de bomba se integra con el sistema de válvulas definido para el proyecto, permitiendo una activación controlada mediante salidas digitales del PLC y sincronización con el ingreso de nuevos lotes de goma. Esta flexibilidad y compatibilidad consolidan su selección como la alternativa más adecuada para el sistema de dosificación propuesto.

#### 4.2.4 Forma del tanque de aditivo

##### **Especificaciones técnicas:**

El tanque de almacenamiento y dosificación del aditivo se diseñó con geometría prismática de base cuadrada, con dimensiones externas de 10 cm  $\times$  10 cm de sección transversal y una altura total de 50 cm. Esta configuración proporciona una capacidad aproximada de 5 litros, suficiente para adaptarse a posibles cambios en el volumen de aditivo requerido, considerando la evaluación de otros aditivos que podrían requerir un volumen mayor por aplicación.

La parte inferior del tanque cuenta con una terminación piramidal invertida de base cuadrada y 2 cm de altura, diseñada para concentrar el fluido hacia un único punto de salida. En el vértice de esta base se incorpora una salida cilíndrica roscada de 1 pulgada de diámetro, que permite la conexión directa con la línea de alimentación mediante una válvula de paso. Esta geometría facilita el vaciado completo del contenido por gravedad y minimiza las zonas de retención de residuos de aditivo.

El tanque está diseñado para su fabricación íntegra en acero inoxidable AISI 316, seleccionado

por su resistencia química, facilidad de limpieza y robustez estructural frente a las cargas generadas por la válvula y el sistema de soporte. En uno de los laterales se integra un visor de nivel transparente que se extiende desde la base de salida hasta la parte superior del tanque, permitiendo la verificación visual continua del volumen disponible.

En la parte superior del tanque se incorpora una tapa atornillada con orificios para alojar tres electrodos verticales que permiten el monitoreo de nivel (mínimo, medio y máximo), así como una boca de entrada adicional para la inyección del aditivo desde el sistema neumático de impulsión. Todas las conexiones, tanto de entrada como de salida, son roscadas, lo que asegura compatibilidad con el resto de la instalación y facilita el montaje y desmontaje.

### **Integración Mecánica:**

El tanque se instalará a una altura superior a la del dosificador de goma, lo que permite el vaciado por gravedad sin requerir bombeo adicional. Se fijará mediante un brazo metálico desmontable, soldado a la estructura del dosificador, que actúa como soporte primario y distribuye uniformemente el peso del tanque y sus accesorios. Aunque el brazo es fijo, el tanque puede desmontarse mediante tornillos laterales para facilitar el mantenimiento preventivo o la limpieza.

### **Justificación:**

El diseño prismático y alargado fue seleccionado por su facilidad de fabricación, eficiencia volumétrica y compatibilidad con el espacio disponible en la planta. La base piramidal con descarga centrada garantiza la evacuación completa del producto, elimina zonas de estancamiento y mejora la trazabilidad del volumen dosificado. La elección de acero inoxidable AISI 316 responde a los requisitos de resistencia química del aditivo y a la necesidad de soportar la válvula de salida sin deformaciones. El uso de conexiones roscadas se ajusta a los estándares constructivos de la planta, facilitando la integración del sistema sin requerir adaptadores o herramientas adicionales.

La incorporación de un visor lateral y sensores de nivel garantiza el monitoreo continuo del proceso sin intervención directa del operador. El diseño no requiere tareas frecuentes de limpieza o mantenimiento, ya que el sistema está concebido para operar de forma autónoma. Sin embargo, la opción de desmontar el tanque permite acceder a su interior en caso de fallas o acumulaciones imprevistas.

## 4.2.5 Válvulas

### Especificaciones técnicas:

El sistema de dosificación propuesto contempla el uso de tres electroválvulas y una de accionamiento neumático. Las electroválvulas serán las encargadas de habilitar o interrumpir el paso de aire comprimido a los actuadores neumáticos del sistema. Estas válvulas se ubicarán dentro del gabinete de control eléctrico, lo cual permitirá minimizar la longitud del cableado requerido y facilitará el ordenamiento del sistema eléctrico, evitando tramos largos de conexión entre los actuadores y la lógica de control. Las conexiones neumáticas estarán compuestas por accesorios rápidos Festo modelo QS-3/8-10-I, que facilitan la instalación y el mantenimiento del sistema.

Las tres electroválvulas seleccionadas son del modelo VUVS-L25-M52-MDG14F8, fabricadas por Festo, las que tienen una presión de operación de entre 36,26 - 145,04PSI, además de que tiene un flujo máximo de 1300L/min(Necesaria para la bomba a definir) y serán utilizadas para controlar la activación de las bombas neumáticas encargadas de transportar el aditivo y de inyectar la goma dosificada hacia la línea de distribución. Estas válvulas tipo 5/2 vías están diseñadas para operar con actuadores de doble efecto, cuentan con retorno por resorte y operan con una tensión de control estándar de 24 VDC. Su robustez y compatibilidad con entornos industriales las hacen idóneas para sistemas que requieren respuesta rápida, confiable y con un diseño compacto.[66]

La cuarta válvula empleada será una válvula de accionamiento neumático, una válvula de asiento inclinado modelo VZXA-B-TS7-3/4"-M2-B, también de la marca Festo, la cual tiene una presión de operación de 72,5-145 PSI. Esta válvula es de tipo normalmente cerrado y su activación se controla neumáticamente mediante una de las electroválvulas anteriormente descritas. Su cuerpo en acero inoxidable garantiza una alta resistencia a los efectos corrosivos del aditivo, mientras que su configuración constructiva permite un cierre efectivo por gravedad, lo que evita goteos o flujos residuales después del cierre.[67]

Todas las señales de control para las electroválvulas serán generadas desde el PLC y se emplearán relés intermedios para ampliar la potencia de conmutación del sistema, a pesar de que el controlador programable cuenta con salidas tipo relé. Esta decisión busca extender la vida útil de las salidas del PLC y facilitar futuras intervenciones de mantenimiento.

**Justificación de selección:**

La selección de las válvulas utilizadas responde a una combinación de criterios técnicos y operativos. Las válvulas VUVS son componentes ampliamente utilizados en otras áreas de la planta, particularmente en sistemas de distribución de tinta en las imprentas y en aplicaciones similares de bombeo de pequeñas cantidades de adhesivo o aceites. Esta situación representa una ventaja significativa en términos de disponibilidad de repuestos, conocimiento técnico del personal de mantenimiento y rapidez de respuesta ante posibles fallos.

En el caso de la válvula de asiento inclinado, su selección responde a criterios funcionales y constructivos. A diferencia de las válvulas de bola o mariposa, esta configuración permite un cierre efectivo del paso de fluido en aplicaciones con caídas por gravedad, sin requerir presurización adicional. Además, su diseño compacto, bajo mantenimiento y resistencia mecánica la convierten en una solución confiable y duradera para el control de aditivo.

**4.2.6 Sensores de nivel****Especificaciones técnicas:**

El sistema de detección de nivel del tanque dosificador está basado en un sensor de tipo conductivo por electrodos, específicamente el relé de nivel Finder modelo 70.01.8.240.0000 [68], diseñado para operar con líquidos conductivos como el aditivo a dosificar. Este sensor utiliza tres electrodos: uno común (referencia eléctrica), uno para el nivel mínimo y otro para el nivel máximo. El relé interpreta el contacto eléctrico entre los electrodos como señales binarias (on/off) según la presencia o ausencia del líquido.

La señal de conmutación se genera al cerrarse el circuito eléctrico cuando el aditivo entra en contacto con los electrodos, lo que permite activar lógicas dentro del PLC como:

- Habilitar el ciclo de dosificación cuando el tanque está dentro del rango adecuado.
- Detener el ingreso de aditivo si se alcanza el nivel máximo.
- Cerrar válvulas cuando se alcanza el nivel mínimo.

El equipo opera con una alimentación de 120 VCA y puede configurarse para trabajar con distintas sensibilidades según la conductividad del líquido. Los electrodos serán de acero

inoxidable 316 y estarán ensamblados mediante conexiones roscadas en la tapa del tanque dosificador, garantizando su facilidad de reemplazo y mantenimiento.

**Justificación:**

- **Compatibilidad funcional:** El Finder 70.01.8.240 es adecuado para líquidos conductivos, sin necesidad de partes móviles o calibraciones sofisticadas. El aditivo posee un pH ácido (aproximadamente entre 5 y 9) y cumple los requerimientos de resistencia al podersele adaptar varillas (electrodos) del acero inoxidable seleccionado.
- **Economía y robustez:** En comparación con sensores ultrasónicos, capacitivos o de presión, este sistema es significativamente más económico y, al no depender de condiciones externas (luz, aire, polvo), ofrece una respuesta estable en entornos industriales.
- **Simplicidad de integración:** Este sensor entrega señales discretas compatibles directamente con entradas digitales del PLC, lo que evita el uso de conversores de señal o módulos adicionales.
- **Mantenimiento simple:** Gracias a su montaje roscado y estructura modular, los electrodos pueden limpiarse o sustituirse fácilmente sin desmontar el tanque completo.
- **Estándar en la industria:** Este tipo de relé de nivel es ampliamente utilizado en la industria para el control de bombas, llenado de depósitos y aplicaciones similares, por lo que su funcionamiento es conocido por el personal de mantenimiento. [69]

#### 4.2.7 Selección del PLC y elementos de control

**Especificaciones técnicas:**

Especificaciones técnicas: Para el sistema automatizado propuesto, se seleccionó el controlador lógico programable (PLC) Allen-Bradley Micro820, modelo 2080-LC20-20QWB, fabricado por Rockwell Automation. Este PLC dispone de 12 entradas digitales y 8 salidas de relé, lo que resulta suficiente para gestionar la lógica del sistema y permite la escalabilidad hacia configuraciones con múltiples dosificadores si es necesario [70]. El PLC se complementa con

un módulo de expansión de entradas digitales modelo 2080-IQ4 y un módulo de salidas de relé modelo 2080-OW4I, ambos del mismo fabricante [71] [72].

Las señales que manejará el sistema son exclusivamente digitales, tanto para sensores como para actuadores. Todas las entradas y salidas trabajan a 24VDC, lo cual es compatible con los dispositivos seleccionados, como los sensores de nivel y las electroválvulas.

### **Justificación de selección:**

La selección del Micro820 se fundamenta principalmente en su compatibilidad total con la plataforma Connected Components Workbench (CCW), la cual permite programar tanto el controlador como las interfaces HMI y otros dispositivos de automatización en un entorno unificado [70]. Esta plataforma es ampliamente utilizada por el equipo de mantenimiento eléctrico de la planta, lo que garantiza experiencia previa, reduce la curva de aprendizaje y facilita la manipulación, programación y futuras actualizaciones del sistema.

El Micro820 permite una expansión sencilla mediante módulos plug-in, como se implementó en este proyecto con la incorporación del módulo 2080-IQ4 para entradas digitales y el 2080-OW4I para salidas de relé. Esta modularidad garantiza la adaptabilidad y escalabilidad del sistema ante futuras mejoras, como la dosificación de diferentes tipos de aditivos o la integración de nuevas unidades de mezcla. El sistema será instalado en un gabinete próximo al dosificador, lo que minimiza el tendido de cables y permite una operación autónoma sin requerir conexión a redes industriales externas.

El uso de microcontroladores u otras plataformas de automatización más simples fue descartado, ya que no están diseñados para entornos industriales. A diferencia de los PLC, los microcontroladores requieren componentes adicionales de acondicionamiento de señal, interfaces de potencia y protección para operar con válvulas, sensores o motores. Además, su programación se realiza en lenguajes más especializados, como C o Python. Los PLC, por el contrario, están diseñados para integrarse directamente con arquitecturas eléctricas industriales, lo que los convierte en una alternativa más robusta, segura y de bajo mantenimiento.

## 4.3 Dimensionamiento de la bomba.

### 4.3.1 Determinación de la viscosidad cinemática del aditivo.

La viscosidad cinemática del aditivo constituye una característica física relevante para el diseño hidráulico del sistema. Por esta razón, se realizó una medición experimental utilizando la copa Zahn #2, regulada por la norma ASTM D4212[73]. Este método fue seleccionado por su facilidad de implementación, uso extendido en la industria para líquidos de baja viscosidad y capacidad para proporcionar resultados adecuados en la estimación del comportamiento del fluido bajo flujo por gravedad. El tiempo de vaciado total del recipiente se registró con un cronómetro, desde la liberación del fluido hasta alcanzar el nivel marcado por el calibrador interno de la copa. Las mediciones se efectuaron directamente sobre el aditivo en condiciones normales de operación.

Para la conversión de los datos de tiempo en viscosidad cinemática se empleó la fórmula empírica establecida para esta copa, la cual es:

$$\nu = 3,5 * (t - 14) \quad (4.1)$$

donde:

- $\nu$  es la viscosidad cinemática en centistokes (cSt),
- $t$  es el tiempo de vaciado en segundos
- 14 s es el tiempo base de corrección para la copa Zahn #2.

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 4.1:** Mediciones de tiempo de vaciado y viscosidad cinemática calculada del aditivo con copa Zahn #2.

Tiempo de vaciado (s)	Viscosidad cinemática (cSt)
17.383	11.84
17.652	12.78
17.918	13.71
17.246	11.36
17.491	12.22

El promedio de viscosidad cinemática calculado con base en las cinco mediciones es de:

$$\bar{\nu} = 12.38\text{cSt} \quad (4.2)$$

Este valor promedio fue empleado en todos los cálculos posteriores relacionados con el diseño de la línea hidráulica, incluyendo el dimensionamiento de la bomba, la estimación del caudal requerido y las pérdidas por fricción.

### 4.3.2 Condiciones de operación esperadas.

Para el dimensionamiento hidráulico del sistema de dosificación de aditivo, es fundamental definir las condiciones físicas bajo las cuales se desarrollará el flujo. Esto garantiza que el diseño permita un suministro eficiente y continuo. Estas condiciones incluyen parámetros como la geometría del sistema, el tiempo de descarga requerido y las pérdidas por fricción generadas a lo largo del recorrido del fluido.

Con el fin de determinar la dimensión adecuada para la bomba, se utilizó una forma generalizada de la ecuación de Bernoulli, la cual se muestra en la ecuación(4.3).

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + H_B - H_T = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \quad (4.3)$$

### Altura de la columna de fluido.

El tanque de aditivo presenta un nivel de fluido variable. Sin embargo, la altura promedio del líquido durante la operación antes de cada ciclo de descarga corresponde a una columna de 31cm. Aunque el tanque posee una altura total de 225cm desde la base hasta su tope superior, debido al consumo cíclico y al control por nivel, la medida de 31 cm resulta representativa de la carga disponible al momento de la activación de la bomba. Por lo tanto, se determinó que:

$$z_1 = 0.310m \quad (4.4)$$

$$z_2 = 2.250m \quad (4.5)$$

### Longitud y geometría de la tubería.

El aditivo será conducido a través de una tubería de PVC de  $\frac{1}{2}$  pulgada de diámetro nominal. Esta tubería fue seleccionada por su resistencia química, facilidad de instalación y bajo peso, como se detalló en el apartado 4.2.2. La longitud total desde el fondo del tanque hasta la entrada del tanque dosificador es de 6.66 m y cuenta con 9 codos de  $90^\circ$  (Como se detalla en el Apéndice A, pagina 6), los cuales introducen pérdidas adicionales por fricción y cambios de dirección del flujo. Para el diámetro y longitud, se obtuvo que:

$$D = \frac{1}{2}in = 0.0127m \quad (4.6)$$

$$L = 6.660m \quad (4.7)$$

### Caudal requerido y velocidad de descarga.

El sistema fue diseñado para entregar una dosis de 1,15 L de aditivo en un tiempo máximo de 5 s. Esta condición impone una demanda mínima de caudal volumétrico, el cual se calculó como:

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{1.15L}{5s} = \frac{1,15mm^3}{5s} = 230\mu\frac{m^3}{s} \quad (4.8)$$

Para determinar la velocidad de descarga del aditivo, es necesario establecer el valor del área de la tubería. Considerando el diámetro obtenido en (4.6), se determinó el área transversal de la tubería como:

$$A = \pi r^2 = \pi\left(\frac{D}{2}\right)^2 = \frac{1}{4}\pi D^2 = \frac{1}{4}\pi(0.0127m)^2 = 126.6769\mu m^2 \quad (4.9)$$

Con los valores obtenidos en (4.8) y (4.9), es posible calcular la velocidad de descarga, mediante la siguiente ecuación:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{230\mu\frac{m^3}{s}}{126.6769\mu m^2} = 1.8156\frac{m}{s} \quad (4.10)$$

### Cálculo de pérdidas de carga en tubería.

Las pérdidas por fricción se dan por la resistencia al flujo generada por el roce del fluido con las paredes internas de la tubería. Estas se calculan mediante la ecuación de Darcy–Weisbach, que relaciona las características geométricas de la tubería, las propiedades del fluido y la velocidad del flujo:

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (4.11)$$

Para calcular el factor de fricción  $f$ , es necesario conocer si el flujo es laminar o turbulento; esta caracterización se obtiene mediante el número de Reynolds, tal como se calcula en la ecuación(4.12).

$$Re = \frac{vD}{\nu} = \frac{1.8156\frac{m}{s} * 0.0127m}{12.38\mu\frac{m^2}{s}} = 1863 \quad (4.12)$$

Ya que  $Re < 2000$ , según la ecuación (4.12), se puede afirmar que el aditivo presenta un flujo laminar, por lo tanto, se calcula el factor de fricción como:

$$f = \frac{64}{Re} = \frac{64}{1863} = 0.03435 \quad (4.13)$$

Entonces, con los valores obtenidos, fue posible calcular las pérdidas en tubería con la ecuación (4.11). Se obtuvo el siguiente resultado:

$$h_f = 0.03435 \cdot \frac{6.660m}{0.0127m} \cdot \frac{(1.8156 \frac{m}{s})^2}{2 * 9.81 \frac{m}{s^2}} = 3.0265m \quad (4.14)$$

Además de las pérdidas por fricción continua ya calculadas, el sistema también presenta pérdidas debidas a los accesorios (codos, válvulas, uniones, cambios de sección). Estas pérdidas se expresan mediante el coeficiente de pérdida  $k$  de cada componente, el cual se calcula mediante:

$$h_L = \sum K \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (4.15)$$

Ya que la tubería cuenta con 9 codos cuyo coeficiente  $k=0.9$ [75] [76], de la aplicación de la ecuación (4.15), se obtuvo lo siguiente:

$$h_L = 9 \cdot 0.90 \cdot \frac{(1.8156 \frac{m}{s})^2}{2 * 9.81 \frac{m}{s^2}} = 1.3609m \quad (4.16)$$

Con los resultados obtenidos en las ecuaciones (4.14) (4.17), fue posible calcular las pérdidas totales en tubería para la configuración propuesta, tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$H_T = h_f + h_L = 3.0265m + 1.3609m = 4.3874m \quad (4.17)$$

Con el total de las pérdidas y tomando en cuenta que la presión propia del tanque de aditivo y la tanqueta son las mismas, ya que se encuentran abiertas al ambiente, es posible calcular el  $H_b$ , mediante la ecuación (4.3), tal que:

$$H_B = z_2 - z_1 + H_T + \frac{v_2^2}{2g} = 2.25m - 0.310m + 4.3874m + \frac{(1.8156 \frac{m}{s})^2}{2 * 9.81 \frac{m}{s^2}} = 6.4954m \quad (4.18)$$

Finalmente, la presión mínima de la bomba para poder mover el aditivo, con una cabeza de presión obtenida en (4.18), se calculó como:

$$P_B = \rho \cdot g \cdot h = 1180 \frac{kg}{m^3} \cdot 9.81 \frac{m}{s^2} \cdot 6.4954m = 75190Pa = 10.9054PSI \quad (4.19)$$

### Verificación de la capacidad de la bomba seleccionada.

La solución diseñada para la dosificación del aditivo debe garantizar un suministro eficiente y preciso en la línea de producción, cumpliendo con los requerimientos de volumen y tiempo establecidos. Se determinó que la bomba debe desplazar un volumen de 1,15 L de aditivo en un máximo de 5 segundos. Con base en esta necesidad, los cálculos hidráulicos indicaron una presión mínima de operación de 10.9054 PSI, considerando las pérdidas por fricción, pérdidas menores, altura estática, viscosidad del fluido y diámetro interno de la tubería.

Se seleccionó para este propósito una bomba neumática de diafragma modelo ARO 666053-344. Según su hoja técnica, este modelo está diseñado para operar con presiones de aire comprimido de entre 80 y 100 PSI, lo que representa un margen de presión disponible significativamente superior al requerido por el sistema. Este tipo de bomba presenta una relación de transmisión de presión cercana a 1:1 (aire:fluido), es decir, puede entregar al fluido una presión equivalente a la del aire suministrado, siempre que no existan pérdidas internas excesivas ni contrapresiones imprevistas. [74]

Este modelo de bomba también se utiliza ampliamente en la planta para aplicaciones similares, lo que respalda su fiabilidad en condiciones reales de operación. La disponibilidad de hasta 100 PSI garantiza que el sistema cumplirá con los tiempos de descarga establecidos y podrá compensar posibles aumentos en la viscosidad del aditivo, desgaste de componentes o

pequeñas obstrucciones en la línea. Es fundamental que la válvula suministre un caudal de aire de 600 L/min.

Se concluye que la bomba ARO 666053-344 satisface plenamente las exigencias hidráulicas del sistema en cuanto a caudal y presión, lo que asegura el correcto funcionamiento del proceso automatizado de dosificación del aditivo.

## 4.4 Diseño del contenedor de aditivo.

### 4.4.1 Diseño CAD y especificaciones.

#### Dimensiones, volumen y estructura inferior.

El tanque de aditivo fue diseñado con una estructura prismática de base cuadrada de 10cm  $\times$  10cm y una altura útil de 50cm, lo que proporciona un volumen rectangular de:

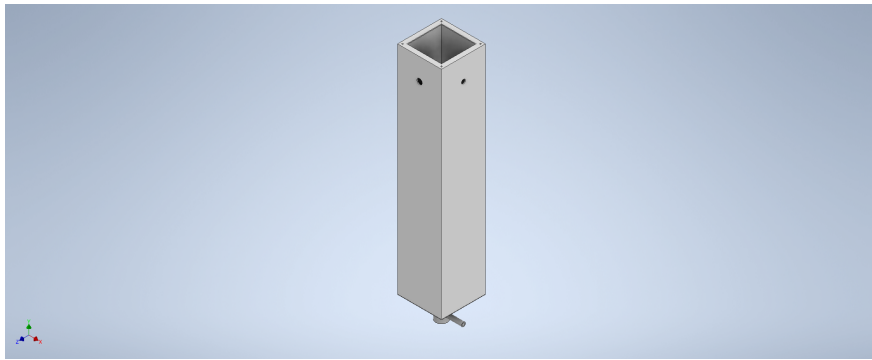
$$V_{\text{prisma}} = 0.10 \text{ m} \times 0.10 \text{ m} \times 0.50 \text{ m} = 0.005 \text{ m}^3 = 5.00 \text{ L} \quad (4.20)$$

A este volumen se le suma un fondo en forma de pirámide cuadrangular invertida de altura 2cm, lo que permite el direccionamiento del fluido hacia la salida. El volumen de la pirámide es:

$$V_{\text{pirámide}} = \frac{1}{3} \times 0.10 \text{ m} \times 0.10 \text{ m} \times 0.02 \text{ m} = 0.000067 \text{ m}^3 = 67 \text{ mL} \quad (4.21)$$

Por tanto, tomando en cuenta el resultado de la ecuación 4.20 y de la ecuación 4.21, el volumen total del tanque es aproximadamente 5,067L, lo cual es suficiente para alimentar varios ciclos de dosificación de 1.15L cada uno.

La base piramidal facilita el vaciado completo del aditivo, ya que concentra el líquido en el vértice inferior donde se ubica la salida roscada de 1" de diámetro. Este diseño favorece el drenaje por gravedad y evita zonas de estancamiento que podrían comprometer la limpieza o generar acumulación de residuos.

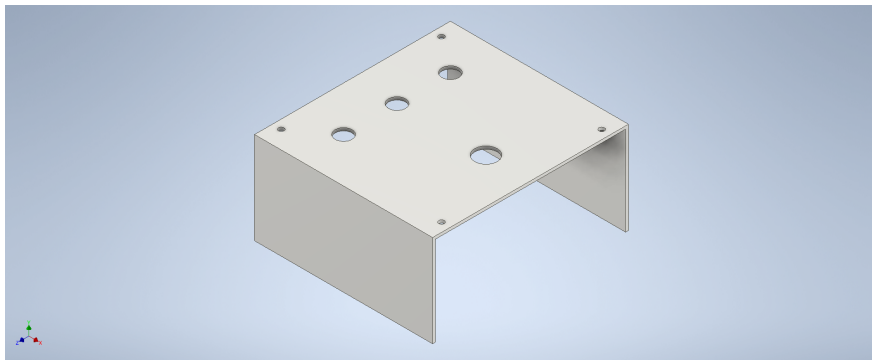


**Figura 4.7:** Cuerpo de almacenamiento de aditivo.

Fuente: Elaboración propia.

### Parte superior.

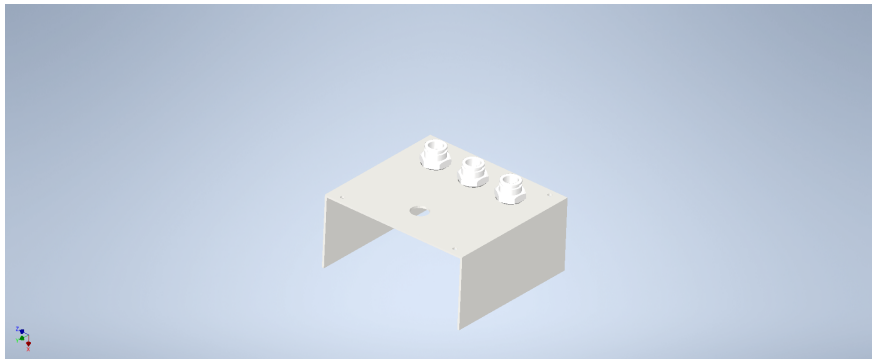
En la parte superior se ubica una tapa atornillada con cuatro orificios, tres de ellos destinados a electrodos de nivel (nivel alto, común y bajo) y uno como entrada del aditivo desde el sistema de alimentación. Este diseño garantiza un sistema de sensado confiable mediante el principio de conducción entre electrodos, además de permitir el llenado seguro del tanque, tal como se muestra en la figura 4.8.



**Figura 4.8:** Tapa superior.

Fuente: Elaboración propia.

A esta tapa se le colocan tres fittings roscados para manguera, que permiten el ingreso de los electrodos y proporcionan sujeción para modificar su altura. De este modo, si es necesario variar el volumen del aditivo inyectado al sistema, se puede realizar de manera accesible sin alterar significativamente el sistema, tal como se muestra en la figura 4.9



**Figura 4.9:** Tapa superior con accesorios.

Fuente: Elaboración propia.

### Visor de nivel.

En una de las paredes laterales del tanque, se instala un visor transparente que se extiende desde la salida inferior hasta la parte superior, lo que permite validar visualmente el nivel de aditivo y facilita las tareas de inspección sin abrir la tapa. Este visor va soportado por dos fittings roscados que están ubicados en los costados, los cuales permiten que el fluido indique desde la parte más baja del tanque, tal como se muestra en la figura 4.10.



**Figura 4.10:** Visor de nivel.

Fuente: Elaboración propia.

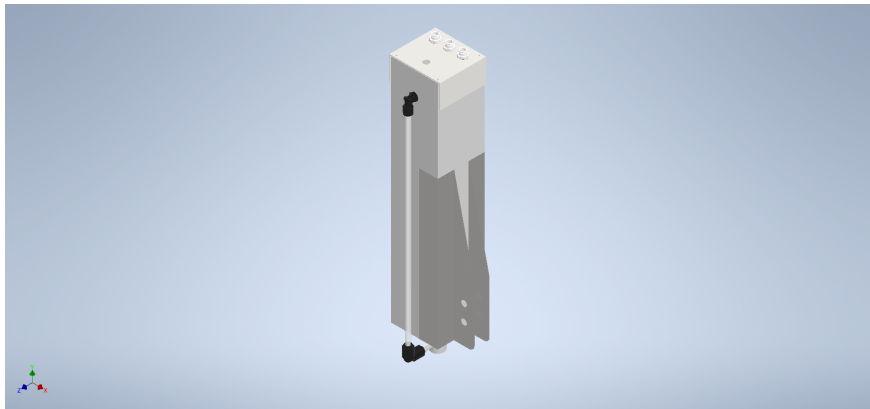
### Montaje y soporte.

El tanque será instalado a una altura superior a la del dosificador, para aprovechar la caída por gravedad. Este estará sujeto a un brazo desmontable, el cual tendrá dos brazos soldados a la estructura del dosificador, lo que facilita su desmontaje en caso de mantenimiento o

limpieza. Estos brazos contarán con tornillos de sujeción, lo que permitirá desmontar el tanque sin comprometer el resto del sistema.

### Ensamble general del tanque.

Como complemento al diseño dimensional y funcional detallado en el apartado anterior, se presenta el ensamble general del tanque de aditivo mediante un diagrama técnico que permite visualizar la integración de todos sus componentes estructurales. Esta representación gráfica facilita la comprensión del montaje completo del tanque, incluyendo su base estructural, espacios para conexiones hidráulicas, espacios para los sensores de nivel, tapa, visor y conexión de válvula de descarga, tal como se muestra en la figura 4.11.



**Figura 4.11:** Ensamble general.

Fuente: Elaboración propia.

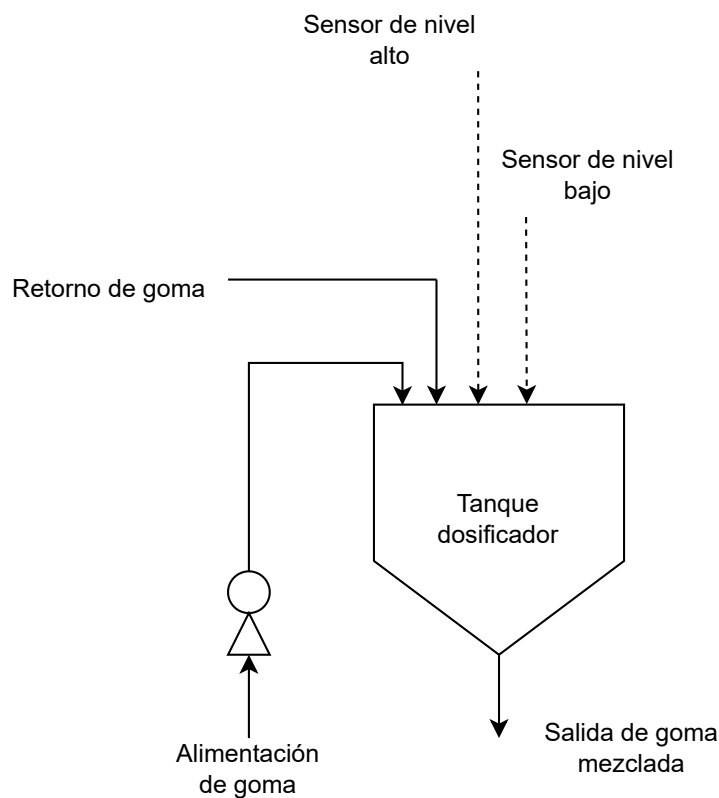
## 4.5 Integración a la línea de producción.

### 4.5.1 Diagrama general de integración física.

La implementación del sistema automatizado de dosificación de aditivo modificó la configuración física de la cocina de goma. Debido a su diseño modular, la estructura mecánica requirió únicamente ajustes menores. Esta transformación se evidencia en los esquemas de este apartado, los cuales comparan el estado previo y posterior a la integración del dosificador.

### Instalación física previa.

En el sistema anterior, la línea de alimentación de goma funcionaba de manera lineal y directa, sin dosificación de aditivos ni sensores de control. La goma ingresaba desde el tanque de alimentación hacia la línea de retorno o directamente a producción, sin mecanismos automáticos para ajustar la viscosidad o controlar la mezcla. Esta falta de instrumentación generaba dependencia de la intervención manual, lo que incrementaba la probabilidad de errores, obstrucciones o sobredosificaciones. El sistema previo se ilustra en la figura 4.12.



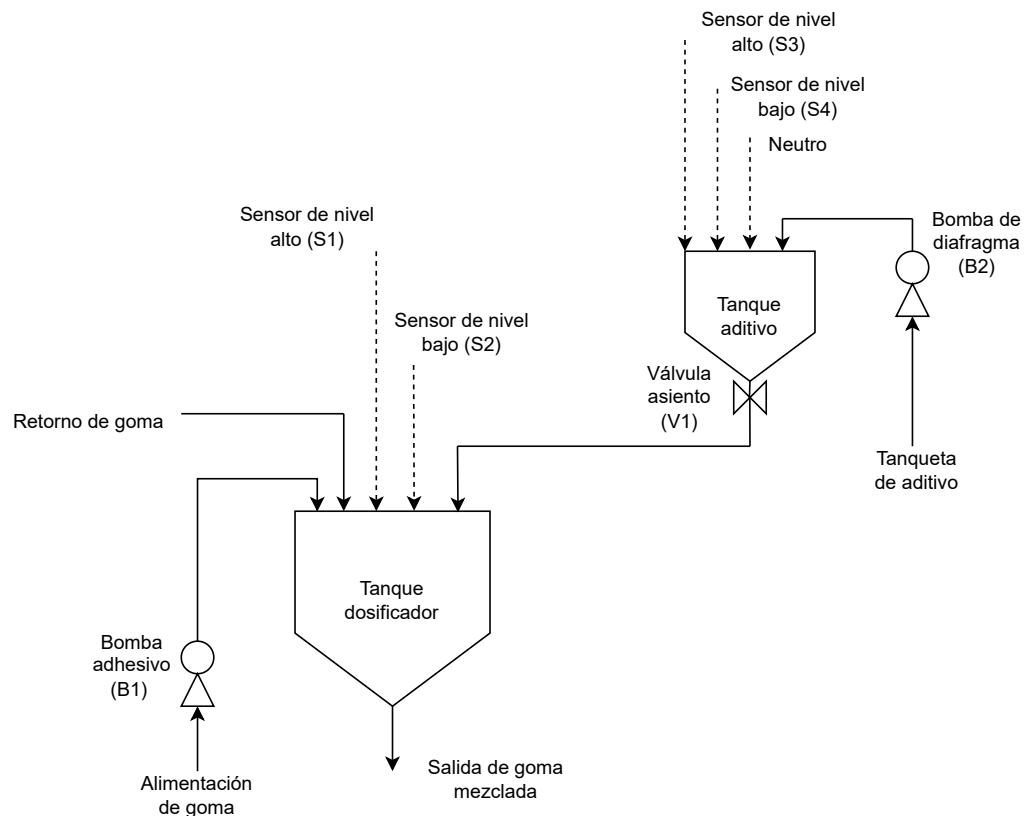
**Figura 4.12:** Esquema original del tanque dosificador de goma.

Fuente: Elaboración propia.

### Integración del sistema propuesto.

La figura 4.13 presenta un esquema del sistema propuesto, en el que se observa la incorporación física de los elementos clave del nuevo sistema:

- Se integró un nuevo tanque dosificador elevado que contiene el aditivo anticoagulante. Este tanque está equipado con sensores de nivel alto y bajo y descarga el aditivo por gravedad hacia la línea de mezcla.
- Se añadió una bomba de diafragma para facilitar la inyección controlada de goma en la etapa de dosificación
- Se instaló un gabinete de control que centraliza el PLC, los módulos de entradas/salidas y las electroválvulas; este se posicionó estratégicamente cerca del dosificador para reducir el cableado y facilitar el mantenimiento.
- Se incorporaron líneas de conexión neumática y eléctrica que alimentan las válvulas y sensores, permitiendo el funcionamiento automático del sistema.



**Figura 4.13:** Esquema del tanque dosificador de goma, con control de aditivo.

Fuente: Elaboración propia.

## 4.5.2 Compatibilidad con operación actual.

El sistema dosificador fue diseñado para garantizar su compatibilidad con la línea existente de preparación y distribución de goma. Esta compatibilidad se consideró en dos niveles: físico-funcional y operativo, con el objetivo de evitar modificaciones significativas al proceso productivo o interrupciones prolongadas.

### **Integración física no invasiva.**

Desde la etapa de diseño, se contempló la integración del sistema con la infraestructura existente. El tanque de aditivo se ubicó estratégicamente sobre el tanque dosificador, parte de la línea de alimentación de goma, utilizando un soporte estructural independiente que no interfiere con los flujos principales ni con la labor del operador.

Los elementos incorporados, como la bomba neumática de diafragma, las válvulas y el gabinete de control, se seleccionaron y ubicaron para no afectar el mantenimiento ni la operación del sistema existente. Las conexiones eléctricas y neumáticas se canalizaron por rutas protegidas, y el tendido de cableado se optimizó mediante el montaje interno de las electroválvulas.

### **Modos de operación: automático y manual.**

El sistema fue concebido para operar en dos modos principales: **automático** y **manual**.

**Modo automático:** Cuando el sistema detecta el ingreso de un nuevo lote de goma a la línea, la dosificación del aditivo se activa automáticamente. Esta activación depende del estado de los sensores de nivel y de la secuencia lógica programada en el PLC. Las válvulas operan de manera sincronizada, lo que garantiza la homogeneidad de la mezcla sin intervención del operador.

**Modo manual:** En situaciones que requieren operar sin aditivo, como mantenimiento, limpieza o ajustes, el sistema puede configurarse en modo manual mediante una interfaz sencilla. Esta configuración permite mantener el flujo de goma sin la intervención del dosificador, preservando la continuidad de la operación original.

## **Transición operativa sin curva de aprendizaje.**

La selección de componentes estándar en la planta, como las bombas ARO, válvulas FESTO y el PLC Allen-Bradley, elimina la necesidad de capacitación adicional significativa para el personal de mantenimiento. La familiaridad con estos equipos facilita una rápida adaptación al nuevo sistema, reduce la curva de aprendizaje y asegura una transición fluida. En conjunto, estas medidas permiten que el sistema dosificador automatizado se integre eficazmente al proceso existente, aportando mejoras sustanciales sin afectar la operatividad previa.

## **4.6 Diseño de la lógica de control (PLC).**

### **4.6.1 Diagrama de flujo funcional.**

La lógica de funcionamiento del sistema se basa en una secuencia de eventos que responde al estado de los sensores de nivel y al accionamiento de válvulas y bombas. Esta lógica se representa mediante un diagrama de flujo funcional (véase Figura 4.14), que facilita la comprensión de la dinámica cíclica de llenado, control y espera del sistema.

El proceso se inicia manualmente al presionar el botón de inicio. Una vez activado el sistema, se evalúa el nivel en el tanque principal de aditivo mediante el sensor de nivel bajo S4. Si el fluido no lo está tocando, esto indica que el tanque necesita ser recargado, por lo que se activa la bomba B2. Esta bomba continúa operando hasta que el nivel alcanza el sensor de nivel alto S3, momento en que se detiene la operación, dejando el tanque principal lleno y listo para alimentar el tanque dosificador.

A continuación, el sistema analiza el nivel del tanque dosificador a través del sensor de nivel bajo S2. Si este no detecta la presencia de adhesivo, se activa la bomba B1 y se abre la válvula V1 (una válvula de asiento inclinado), permitiendo el vaciado del tanque de aditivo. Durante esta transferencia, si el nivel del tanque de aditivo baja nuevamente y S4 lo detecta, se cierra la válvula V1 y se reactiva la bomba B2 para recuperar el nivel. Esta acción se detiene al alcanzar nuevamente S3.

El llenado del tanque dosificador continúa hasta que el nivel alcanza el sensor de nivel alto S1, momento en que se apaga la bomba B1, dando por finalizado el ciclo de dosificación. El

sistema permanece en espera hasta que se detecta una nueva condición de nivel bajo en S2, momento en que reinicia el ciclo desde el paso de transferencia.

Esta lógica garantiza la disponibilidad continua de una cantidad precisa de adhesivo dosificado, sin intervención del operador, y permite que el sistema responda en tiempo real a las variaciones de consumo y nivel. La programación del controlador se realizó en lenguaje Ladder, como se detalla en el apartado 4.6.2.

La Figura 4.14 muestra gráficamente este flujo funcional y refleja la secuencia de decisiones y acciones del sistema.

### 4.6.2 Representación en Ladder.

Para esta sección se implementó un programa de control en lenguaje escalera (Ladder) dentro del PLC Micro820 de Allen-Bradley, utilizando el entorno Connected Components Workbench. Este permite visualizar de manera estructurada la secuencia lógica de actuación de sensores, válvulas y bombas, además de incorporar funcionalidades adicionales como operación manual y circuitos de parada de emergencia.

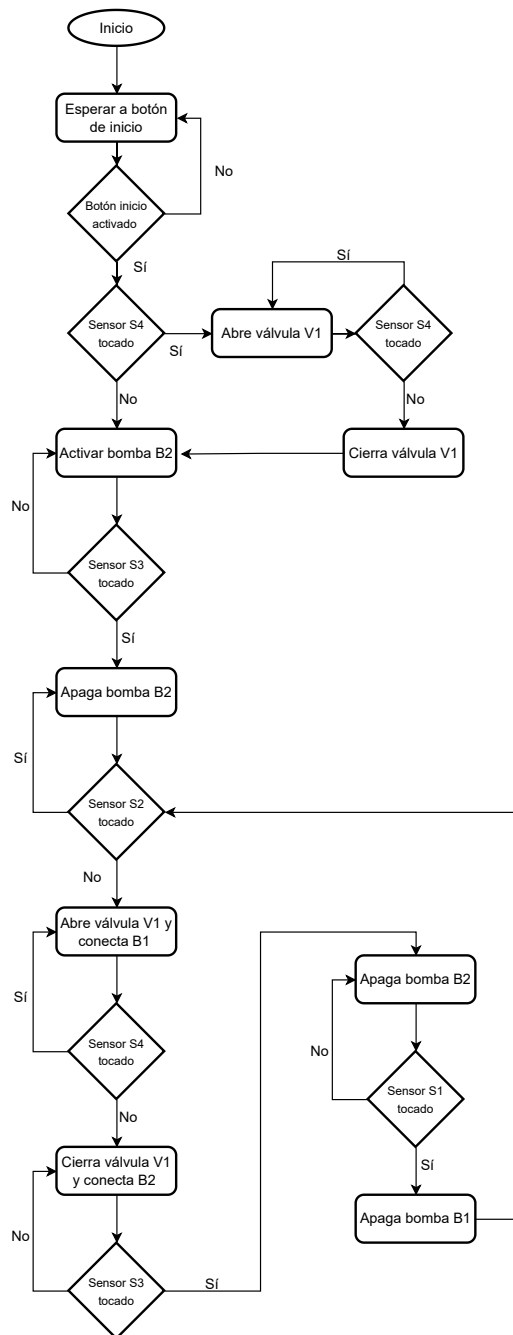
El programa está conformado por cinco *rungs* principales, los cuales se detallan a continuación:

#### Rung 1 – Circuito de habilitación general.

Este *rung* representa la condición básica de habilitación del sistema. La salida `Enable` se activa únicamente cuando se encuentra activo el pulsador de encendido (`Encendido, _IO_EM_DI_00`) y no hay condición de parada de emergencia (`Paro_Emergencia, _IO_EM_DI_07`). Esta señal de habilitación es requisito previo para todos los *rungs* operativos subsecuentes, actuando como un enclavamiento de seguridad general.

#### Rung 2 – Llenado del tanque de aditivo.

En este segmento se controla la activación de la bomba 2 (`Bomba_2, _IO_EM_DO_01`) responsable de llenar el tanque de aditivo. La bomba se activa cuando:



**Figura 4.14:** Diagrama de flujo de solución propuesta.

Fuente: Elaboración propia.

- El sistema está habilitado (**Enable**),
- El sistema está en modo automático (**Mode, \_IO\_EM\_DI\_03**),

- El sensor de nivel bajo del tanque de aditivo (`Resin_Sig, _IO_EM_DI_01`) está activo (es decir, el nivel es bajo),

Este diseño permite llenar el tanque de aditivo solo cuando el nivel es bajo.

### **Rung 3 – Transferencia de aditivo hacia el tanque dosificador.**

Este *rung* controla la apertura de la válvula de asiento (`Valvula, _IO_EM_DO_02`), que permite el paso de aditivo desde el tanque principal hacia el tanque dosificador. La válvula se activa únicamente cuando:

- El sistema está habilitado (`Enable`),
- Se está en modo automático (`Mode`),
- Se solicita la transferencia (`Delay`),
- Y el tanque de aditivo tiene aditivo disponible (`Resin_Sig, _IO_EM_DI_01`).

Nótese que al activarse la señal que solicita la transferencia del aditivo, el sistema abre la válvula y se enclava para mantener la válvula abierta todo el tiempo que es necesario liberar el aditivo, una vez se completa la descarga, la señal del sensor de nivel cierra la válvula, quitando el enclavamiento.

### **Rung 4 – Llenado del tanque dosificador.**

Este tramo controla la bomba 1 (`Bomba_1, _IO_EM_DO_00`) encargada de llenar el tanque dosificador. Esta bomba se activa si:

- El sistema está habilitado (`Enable`),
- Se encuentra en modo automático (`Mode`),
- El sensor de nivel bajo del tanque dosificador (`Glue_Sig, _IO_EM_DI_02`) indica que el tanque está vacío.

La bomba se apaga una vez que el nivel alto es alcanzado, cerrando así el ciclo de dosificación.

## Rung 5 – Delay de descarga.

Este tramo controla la señal de solicitud de aditivo (Delay) encargada de activar el vaciado del dosificador:

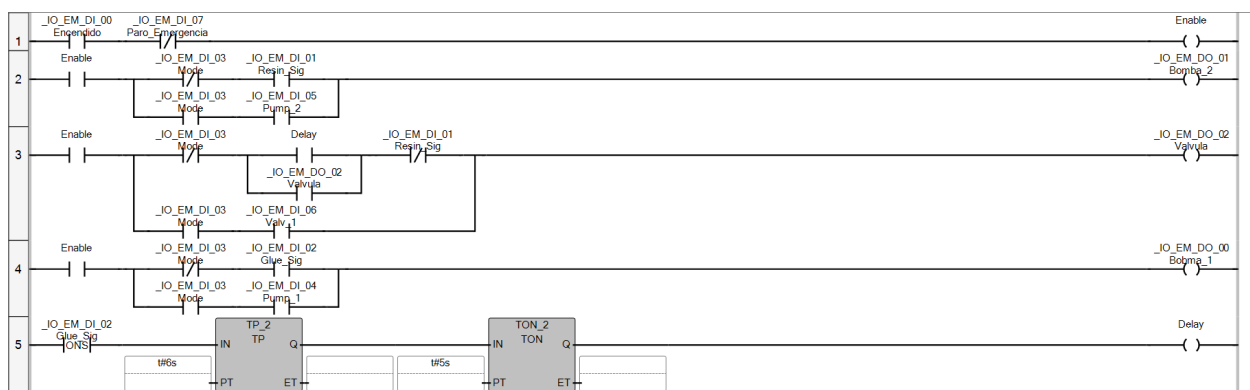
- El sensor de nivel bajo del tanque dosificador (Glue\_Sig, \_IO\_EM\_DI\_02) indica que el tanque está vacío.

Una vez el tanque dosificador está vacío, se requiere reponer goma con el nuevo lote, además de que se requiere la descarga del aditivo, esta genera la señal de descarga 5 segundos después del inicio del rellenado, para que el aditivo se mezcle de forma consistente con la goma nueva.

## Variables y asignación de E/S.

El sistema cuenta con un conjunto de variables de tipo BOOL claramente etiquetadas, que se relacionan directamente con las entradas y salidas digitales del PLC. La tabla de declaración incluye alias como Encendido, Paro\_Emergencia, Pump\_1, Pump\_2, Valv\_1, Glue\_Sig y Resin\_Sig, facilitando la legibilidad del código y la trazabilidad con el diagrama de flujo funcional.

La Figura 4.15 presenta el diagrama Ladder implementado en el entorno de programación, donde se visualizan las condiciones de cada transición lógica y los elementos de salida activados por los contactos correspondientes.



**Figura 4.15:** Diagrama Ladder implementado en el PLC Micro820, con modos de operación manual y automático.

Fuente: Elaboración propia.

## 4.7 Conexiones eléctricas.

### 4.7.1 Conexión eléctrica y lógica del sistema.

La integración eléctrica del sistema dosificador automatizado se diseñó para garantizar una interconexión eficiente, ordenada y segura entre todos los componentes, incluidos los sensores de nivel, bombas, válvulas y el controlador lógico programable (PLC). Esta instalación cumple con los requisitos funcionales del sistema y sigue buenas prácticas de señalización, separación de cargas, alimentación protegida y accesibilidad para mantenimiento.

#### **Alimentación y distribución de energía.**

El sistema opera con una acometida de 110VAC, que se transforma y distribuye como 24VDC para alimentar los módulos de entradas y salidas del PLC, así como los actuadores, como bombas y válvulas. La distribución de potencia se realiza mediante bornes claramente identificados (L1, N, GND), desde los cuales se derivan las líneas hacia los módulos de control y las cargas conectadas.

#### **Asignación de entradas digitales.**

El módulo de entradas digitales del PLC recibe señales de 12 dispositivos externos, distribuidos de la siguiente manera:

- I1: Pulsador de inicio de operación.
- I2: Sensor de nivel bajo en tanque dosificador (*Glue\_Sig*).
- I3: Sensor de nivel bajo en tanque de aditivo (*Resin\_Sig*).
- I4: Modo automático (*Mode*).
- I5–I8: Reservados para señales adicionales o expansión futura.
- I9: Paro de emergencia.
- I10–I12: Entradas auxiliares (actualmente libres).

Esta asignación permite al sistema interpretar el estado de nivel de ambos tanques, determinar el modo de operación y atender condiciones de seguridad.

### **Asignación de salidas digitales.**

Las salidas tipo relé del PLC están destinadas al control de los elementos actuadores, con la siguiente distribución:

- Q1: Activación de la bomba de llenado del tanque dosificador (Pump\_1).
- Q2: Activación de la bomba de aditivo (Pump\_2).
- Q3: Activación de la válvula de asiento (Valv\_1).
- Q4-Q7: Reservados para expansión futura.

Cada salida está protegida y conectada a través de relés intermedios (SOL1, SOL2, SOL3), mejorando la seguridad eléctrica y permitiendo el uso de cargas de mayor corriente en el sistema.

### **Ensamble de válvulas solenoides.**

El conjunto de válvulas solenoides se organizó en un módulo de fácil acceso, donde cada válvula se conecta directamente a su respectiva salida del PLC. Este ensamble incluye bornes **GND** individuales para cada componente, lo que facilita la trazabilidad del cableado y reduce las interferencias electromagnéticas.

### **Referencia a planos eléctricos.**

La instalación completa puede observarse en los planos eléctricos adjuntos en el Apéndice B. Dichos planos están compuestos por tres hojas:

- **Hoja 1:** Esquema de conexión a la acometida eléctrica y distribución de entradas digitales.
- **Hoja 2:** Asignación de salidas digitales y conexiones a actuadores.

- **Hoja 3:** Ensamble físico del módulo de válvulas solenoides.

Estos diagramas, elaborados con simbología industrial estandarizada, facilitan la verificación de la instalación durante la puesta en marcha y permiten realizar tareas de mantenimiento de manera clara y precisa.

# Capítulo 5

## Resultados y Análisis.

### 5.1 Metodología de validación.

Con el objetivo de verificar el cumplimiento de las necesidades funcionales definidas en el Capítulo 3, se realizaron pruebas de validación en la cocina de goma de la Corporación de Desarrollo Agrícola Del Monte, específicamente en la línea de operación del sistema dosificador automatizado. Los resultados demostraron que el sistema activa, dosifica y controla el aditivo de manera adecuada bajo condiciones reales de operación, manteniendo la repetibilidad del proceso y una integración segura con el flujo productivo existente.

#### 5.1.1 Condiciones generales de las validaciones.

Las pruebas se realizaron utilizando el aditivo real en la misma línea de alimentación de goma empleada en producción. El sistema se instaló en paralelo al circuito existente, lo que permitió que las validaciones se efectuaran sin interferir con la operación de la planta.

La presión neumática se mantuvo constante en 100 PSI, correspondiente a la línea principal de aire comprimido de la planta. En cada ciclo se dosificaron 1,15 L de aditivo y se estableció como criterio que el vaciado total del tanque fuera inferior a 5 s, asegurando así la integración inmediata al sistema.

Se realizaron 100 ciclos de validación por cada prueba bajo condiciones operativas constantes, con el fin de garantizar la comparabilidad y la representatividad estadística de los resultados.

### **5.1.2 Instrumentos y procedimiento de medición.**

Para registrar los resultados experimentales se emplearon cronómetros digitales y un recipiente graduado con divisiones de 20 mL (el mismo empleado en la operación diaria). Las mediciones se realizaron manualmente y posteriormente se digitalizaron para su análisis.

Durante las pruebas se documentaron los tiempos de descarga, el comportamiento del flujo de aditivo, la respuesta del sistema de control y la estabilidad de la presión neumática.

### **5.1.3 Preparación y calibración previa**

Previo a las validaciones, se calibraron los sensores de nivel del tanque de aditivo y se ajustó el punto de activación al volumen objetivo de 1.15 L. Se verificó la estanqueidad de todas las conexiones neumáticas y de proceso, asegurando la ausencia de fugas o pérdidas de presión. Para la calibración se utilizó agua, validando tanto el volumen de control como la hermeticidad. Estas actividades se llevaron a cabo durante un fin de semana, periodo en el que la producción permaneció detenida.

### **5.1.4 Ejecución y supervisión de las pruebas.**

Las validaciones se realizaron con el sistema instalado en su ubicación final, en paralelo al proceso principal, por lo que todas las funciones se evaluaron bajo las mismas condiciones de operación.

Las cuatro pruebas definidas (Prueba 1: Activación y precisión de dosificación, Prueba 2: Integración con la línea de goma, Prueba 2B: Compatibilidad física y funcional, y Prueba 3: Subsistema de control) se ejecutaron en paralelo, lo que permitió recopilar los resultados de manera secuencial conforme se completaba cada ciclo de producción. La supervisión se realizó de manera directa y se registró tanto la información técnica como la evidencia fotográfica correspondiente.

### 5.1.5 Criterios de validación.

El sistema se consideró validado cuando las métricas de cada prueba cumplieron con los valores objetivo establecidos en el Capítulo 3. Las condiciones mínimas fueron:

- Dosificación automática completa sin intervención humana.
- Error de volumen menor o igual al 5%.
- Tiempo de vaciado inferior a 5 s.
- Ausencia de fugas, fallos de activación o errores de registro.
- Cumplimiento de los criterios de trazabilidad, mantenimiento y seguridad del operador.

## 5.2 Prueba 1: Evaluación del sistema de activación y precisión de dosificación de aditivo

### 5.2.1 Objetivo de la prueba.

Esta validación tuvo como objetivo verificar el funcionamiento adecuado del sistema de activación automática y la precisión en la dosificación del aditivo durante ciclos repetitivos de operación. La prueba fue diseñada para evaluar el comportamiento cíclico del sistema, incluyendo el arranque y cierre de cada dosificación, la estabilidad del caudal y la repetibilidad del volumen.

### 5.2.2 Descripción de la prueba

Se ejecutaron 100 ciclos consecutivos bajo condiciones reales de operación en planta. Cada ciclo incluyó la detección de un nuevo lote de goma, la activación automática del sistema, la apertura de la válvula, la operación de la bomba neumática y el cierre del flujo al completar la descarga.

En cada ciclo, la presión neumática se mantuvo constante en 100 psi y el volumen teórico de referencia fue de 1.15 L. Se utilizó el aditivo empleado en producción y las mediciones

se realizaron con un recipiente graduado y cronómetros digitales, registrando manualmente tanto el volumen dosificado como el tiempo de vaciado en cada repetición.

### 5.2.3 Resultados experimentales.

Los resultados de las 100 mediciones de volumen y tiempo de descarga fueron procesados estadísticamente, obteniéndose los valores presentados en la Tabla 5.1.

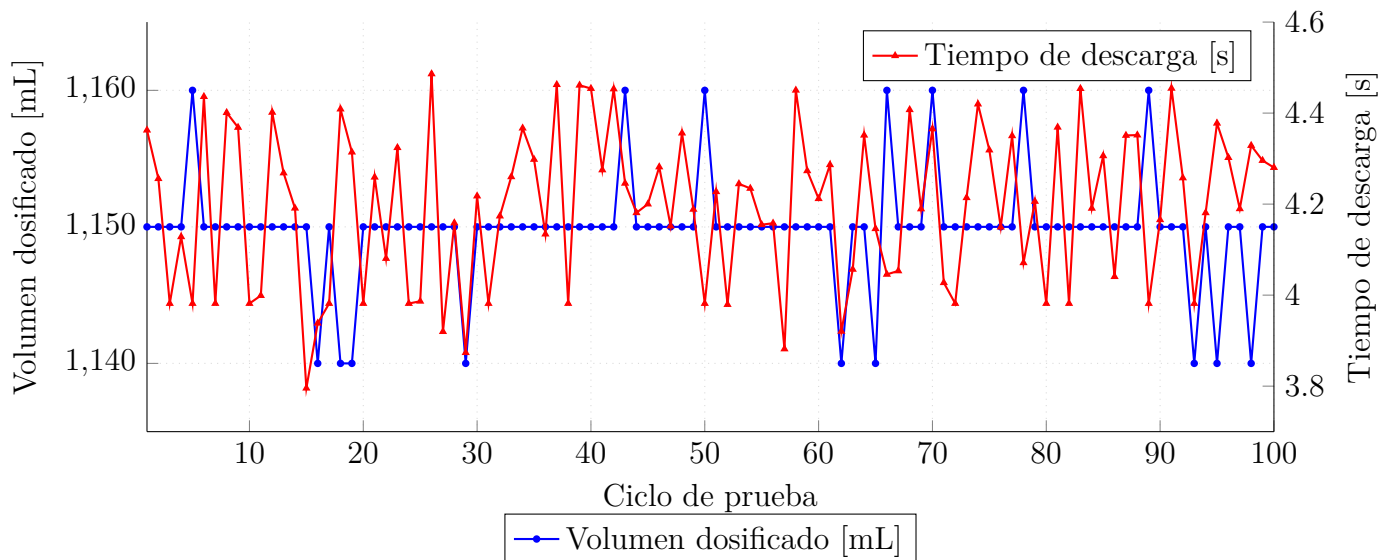
**Tabla 5.1:** Resumen estadístico de los resultados de la Prueba 1.

Parámetro	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo	Error relativo (%)
Volumen dosificado [mL]	1149.8	4.02	1140	1160	0.14
Tiempo de descarga [s]	4.20	0.17	3.80	4.49	–

Para la validación de los datos individuales obtenidos, se sugiere consultar el apéndice C.

### 5.2.4 Representación gráfica de resultados

La Figura 5.1 ilustra la variación del volumen dosificado y del tiempo de descarga a lo largo de los 100 ciclos de validación.



**Figura 5.1:** Variación del volumen dosificado y del tiempo de descarga durante 100 ciclos de prueba.

Fuente: Elaboración propia.

### 5.2.5 Análisis estadístico de la precisión de dosificación.

El error relativo de dosificación se calculó con la ecuación (5.1), tomando como referencia el volumen teórico  $V_t = 1150$  mL y el volumen real medido  $V_r$  en cada ciclo:

$$E_r = \frac{|V_r - V_t|}{V_t} \times 100 \quad (5.1)$$

Adicionalmente, la desviación estándar de los volúmenes dosificados se determinó con la ecuación (5.2):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (V_r - \bar{V})^2}{n - 1}} \quad (5.2)$$

Los resultados obtenidos muestran un error promedio de **0.14%** y una desviación estándar de **4.02mL**. Estos valores confirman una alta repetibilidad y una precisión superior a la exigida en el diseño (5% de error).

### 5.2.6 Análisis e interpretación de resultados.

Durante las pruebas no se registraron disparos falsos ni retrasos en la activación del sistema. El ciclo de apertura y cierre de válvulas se ejecutó correctamente en las 100 repeticiones, sin variaciones perceptibles en la secuencia de enclavamiento. El flujo de aditivo se mantuvo constante, sin fluctuaciones de presión ni formación de burbujas, y el cierre de la válvula fue preciso en todos los casos.

Se observó únicamente el escurrimiento natural posterior al cierre, lo que explica la dispersión mínima del tiempo de vaciado (desviación estándar de 0,17 s). Este efecto es inherente al fluido debido a sus características físicas y no afecta el desempeño del sistema. Los resultados obtenidos confirman que el sistema cumple con las métricas M1, M2, M3, M4 y M5, lo que garantiza un funcionamiento completamente automático, preciso y estable. El error de dosificación es considerablemente menor al límite de diseño y el tiempo de descarga promedio se mantiene por debajo de 5 s, validando el principio de funcionamiento.

## **5.3 Prueba 2: Validación de la admisión de goma en integración con el sistema de control.**

### **5.3.1 Objetivo de la prueba**

El objetivo de esta validación fue verificar la integración adecuada de la función de admisión de goma en el sistema automatizado de dosificación, asegurando que la transferencia de goma desde los tanques de almacenamiento al tanque dosificador ocurra únicamente cuando el proceso lo requiera.

A diferencia del sistema original, esta función utiliza una bomba controlada por el PLC, cuya activación depende de las condiciones lógicas del sistema y del estado de los sensores de nivel del tanque, en lugar de válvulas intermedias.

### **5.3.2 Descripción de la prueba.**

Las pruebas se llevaron a cabo en planta bajo condiciones operativas equivalentes a las de producción. Para su validación, se deshabilitó temporalmente el sistema original de control de admisión de goma y se habilitó el nuevo circuito automatizado, permitiendo la verificación en flujo real de goma y manteniendo la opción de revertir la conexión si fuera necesario.

El sistema fue monitoreado desde una computadora conectada al PLC, lo que permitió observar en tiempo real las señales de control, el estado de los sensores y el comportamiento de la bomba de transferencia. Tras cinco ciclos consecutivos de carga y detención correctos, se confirmó la integración y estabilidad del funcionamiento en operación cíclica.

### **5.3.3 Resultados experimentales**

El sistema presentó un comportamiento estable en todos los ciclos. El control respondió adecuadamente a las señales de los sensores de nivel, activando la bomba únicamente cuando el tanque dosificador se encontraba por debajo del umbral mínimo. La detección de arranque y detención se realizó sin falsos disparos ni rebotes de señal, y no se registraron retrasos perceptibles en la respuesta. Las observaciones realizadas durante esta validación se detallan

a continuación:

**Tabla 5.2:** Resumen de observaciones durante la validación de admisión de goma.

<b>Parámetro evaluado</b>	<b>Resultado observado</b>
Integración del sistema de control	Completa y funcional
Número de ciclos exitosos	5 iniciales, luego operación continua estable
Activación de bomba	Correcta, sin fallos ni retrasos
Lectura de sensores de nivel	Precisa, sin falsos disparos
Intervención manual requerida	No necesaria
Condición de enclavamiento	Operativa, el sistema espera condiciones adecuadas

### 5.3.4 Análisis de integración y comportamiento.

El sistema de control mantuvo la lógica prevista, activando la bomba únicamente cuando el nivel del tanque dosificador se encontraba por debajo del umbral mínimo y deteniendo el flujo al alcanzar el nivel máximo. Este mecanismo previene transferencias innecesarias y asegura la sincronización con la línea de consumo.

La secuencia implementada en el PLC incorpora enclavamientos que impiden iniciar la carga si no se cumplen las condiciones de operación válidas. En caso de que la línea no consuma goma, el sistema permanece en espera sin activar la bomba, lo que evita ciclos innecesarios y optimiza la eficiencia.

### 5.3.5 Conclusiones de la validación

Los resultados obtenidos demuestran que la integración del subsistema de admisión de goma fue exitosa y cumple con las especificaciones de diseño. El control lógico responde adecuadamente a las condiciones del proceso y garantiza que la alimentación del tanque dosificador se realice únicamente cuando sea necesario. No se presentaron fallos, disparos falsos ni interrupciones, lo que confirma la confiabilidad del sistema en condiciones reales de operación.

En consecuencia, esta prueba valida el cumplimiento de las métricas asociadas a las necesidades N2, N7 y N8: arranque automático correcto, prevención de dosificaciones innecesarias

y compatibilidad con la línea de producción existente.

### **5.3.6 Prueba 2B: Verificación de compatibilidad física y funcional de admisión de goma**

#### **Objetivo de la prueba.**

El objetivo de esta validación fue verificar la compatibilidad física y funcional del nuevo sistema de admisión de goma con la línea de producción existente, asegurando que su incorporación no generara interferencias ni requiriera modificaciones estructurales significativas. Se evaluó la integración mecánica del tanque dosificador, la conexión al circuito cerrado de goma y el comportamiento del conjunto durante la operación normal, con el fin de confirmar la viabilidad del diseño.

#### **Descripción de la prueba.**

El sistema de dosificación se integró al circuito cerrado de goma mediante un punto de descarga del aditivo en la línea principal, sin alterar el flujo del proceso. La instalación en paralelo permitió realizar descargas controladas sin interrumpir el transporte continuo de goma dentro del circuito. De este modo, se asegura que el dosificador puede operar de forma autónoma y que la producción se mantiene funcional incluso si el sistema está fuera de servicio.

El tanque dosificador se ubicó en la parte superior del tanque principal de goma, manteniendo la accesibilidad para operación y mantenimiento. Su instalación no interfiere con las tareas de la cocina de goma y, en caso de requerirse un ajuste o servicio de mantenimiento, puede desactivarse sin retirarlo físicamente. El circuito original permanece conectado pero inactivo durante la operación del nuevo sistema, lo que permite revertir la conexión rápidamente si es necesario.

**Tabla 5.3:** Resultados de verificación de compatibilidad física y funcional.

<b>Aspecto evaluado</b>	<b>Resultado observado</b>
Tipo de integración	Paralela al circuito cerrado de goma.
Interferencia con la operación existente	Ninguna.
Accesibilidad del sistema	Total, sin obstrucciones.
Estabilidad de la bomba	Vibración normal tras fijación.
Fugas o filtraciones	No se detectaron.
Continuidad del flujo de goma	Constante, sin sobrepresiones.
Reversibilidad del sistema	Total, sin modificaciones estructurales.

### **Resultados de la validación.**

Durante el periodo de pruebas se verificó que la integración física no afectó la operación normal del sistema de goma ni la estabilidad del proceso. El dispositivo de descarga por gravedad funcionó correctamente y mantuvo la sincronización con el nivel del tanque dosificador, garantizando un abastecimiento continuo sin sobrepresiones ni retornos de fluido. En la primera puesta en marcha se detectó una vibración elevada en la bomba neumática de diafragma, ya que inicialmente no se había fijado a la estructura para facilitar las tareas de mantenimiento.

Una vez anclada con pernos, la vibración se estabilizó dentro de parámetros normales, sin afectar la integridad del equipo ni generar ruido excesivo. Durante el mes de observación posterior, no se registraron fugas, obstrucciones ni deformaciones en las tuberías o conexiones. Los resultados obtenidos durante esta validación se detallan a continuación:

### **Análisis de compatibilidad**

La disposición física del tanque y la línea de descarga fue compatible con la infraestructura existente. El diseño en paralelo permitió incorporar el nuevo sistema sin afectar la operación de la cocina de goma, y su ubicación sobre el tanque principal facilitó el mantenimiento y la supervisión visual del nivel. La independencia funcional entre la línea de goma y el dosificador garantiza que el sistema actúe únicamente como punto de inyección controlada,

sin intervenir en el flujo principal.

Desde el punto de vista operativo, la integración es no invasiva, ya que no requiere modificar el proceso original ni limita el funcionamiento del sistema previo. En caso de paro o mantenimiento, es suficiente desactivar el dosificador y restablecer el control original, lo que proporciona flexibilidad y seguridad operativa.

### **Conclusiones de la validación.**

La verificación realizada confirma que la instalación cumple con los criterios de compatibilidad física y funcional establecidos en el diseño. El montaje no altera el circuito de goma ni interfiere con el flujo de producción, y los componentes instalados (tanque, bomba, válvulas y estructura) demostraron un comportamiento estable y seguro en condiciones reales. Además, la posibilidad de revertir al sistema anterior sin desmontaje refuerza la confiabilidad del diseño.

En consecuencia, el sistema cumple con las métricas asociadas a las necesidades N6, N10 y N12, garantizando la compatibilidad estructural, la facilidad de mantenimiento y la integración con el proceso productivo.

## **5.4 Prueba 3: Validación del subsistema de control**

### **5.4.1 Objetivo de la prueba**

El objetivo de esta validación fue comprobar el funcionamiento del subsistema de control, verificando que la secuencia lógica implementada en el PLC Micro820 respondiera correctamente en los modos automático y manual. Se evaluaron los enclavamientos, las señales de entrada y salida, y los tiempos de respuesta para garantizar un funcionamiento seguro y coordinado, sin requerir intervención del operador.

### 5.4.2 Descripción de la prueba.

Las pruebas se realizaron en el sistema instalado en planta, utilizando el entorno de programación Connected Components Workbench (CCW) para monitorear en tiempo real las señales de control y la lógica de ejecución del programa del PLC.

Se validaron los dos modos de operación:

- **Modo automático:** controla el ciclo completo de dosificación, activando la bomba neumática y las válvulas según las condiciones de nivel en el tanque y la detección de nuevo lote de goma.
- **Modo manual:** permite accionar cada componente (bomba, válvulas y purgas) desde el panel de control para mantenimiento o pruebas.

Durante la validación no se midieron presión ni caudal, ya que el enfoque principal fue la respuesta lógica del PLC y la secuencia de enclavamiento entre etapas. El sistema se observó mediante el monitor en línea del software CCW, donde se registraron los cambios de estado de las variables digitales y los tiempos de transición entre condiciones, además de que esto permitió encontrar falsos contactos que se estaban realizando entre los electrodos y la carcasa junto en la sección de ingreso.

### 5.4.3 Resultados experimentales

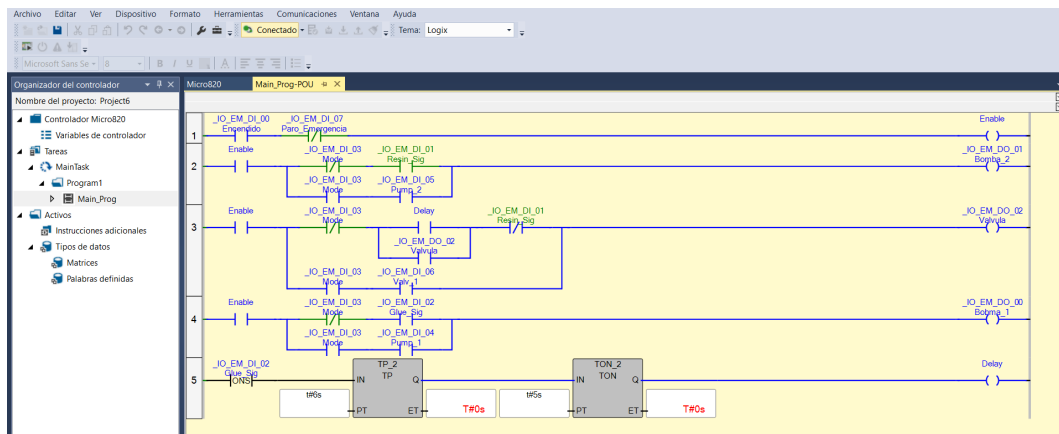
El sistema respondió correctamente en ambos modos de operación y ejecutó la secuencia de dosificación sin fallos. Durante las pruebas iniciales, se detectaron hasta tres descargas consecutivas, atribuibles a la diferencia de tiempos entre el llenado de goma y la condición de nivel bajo. Esta situación se corrigió ajustando la lógica de enclavamiento del PLC, lo que aseguró que la dosificación se ejecutara únicamente tras el cumplimiento de todas las condiciones y la confirmación de la finalización del ciclo anterior.

Posteriormente, el comportamiento del sistema se estabilizó y la secuencia se mantuvo consistente durante las pruebas. El operador supervisó los estados de las variables desde CCW y operó manualmente el sistema cuando fue necesario para tareas de mantenimiento. Los resultados de la validación se presentan a continuación:

**Tabla 5.4:** Resultados de la validación del subsistema de control.

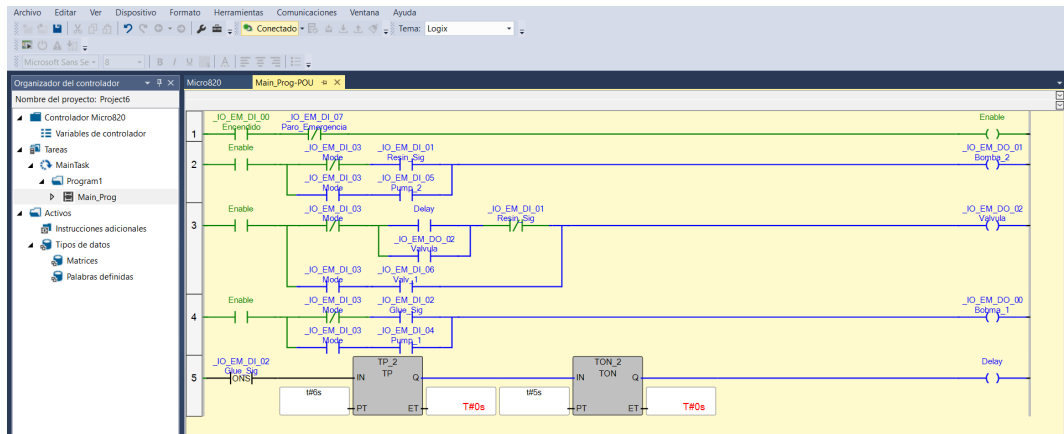
Aspecto evaluado	Resultado observado
Modo automático	Operativo, sin errores de secuencia.
Modo manual	Funcional, permite control individual de componentes.
Monitoreo en CCW	Correcto, todas las señales observadas en tiempo real.
Corrección de lógica	Ajuste exitoso de condiciones de enclavamiento.
Intervención manual	No requerida durante operación automática.
Estabilidad del ciclo	Constante tras ajustes iniciales.

En el caso inicial se observa que, sin la acción de encendido, el sistema no realiza la carga de aditivo aun cuando está energizado, como se muestra en la Figura 5.2.

**Figura 5.2:** Secuencia de inicio. Fuente:

Elaboración propia.

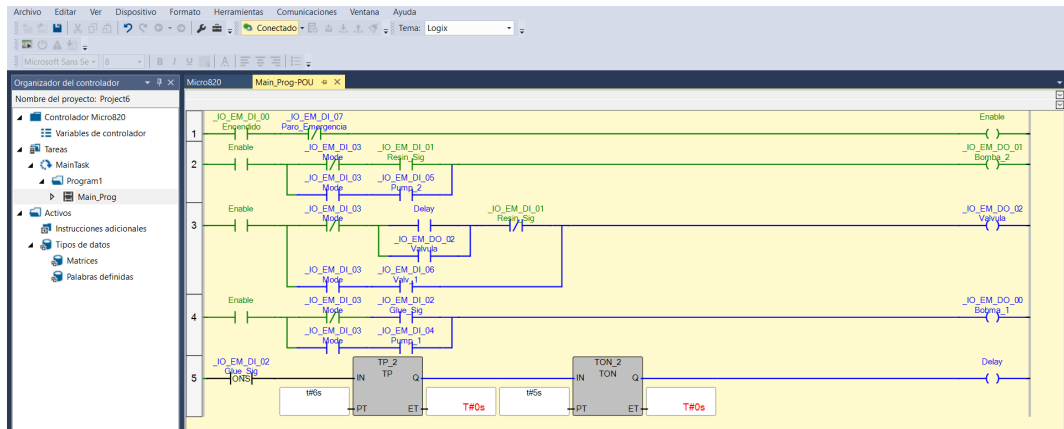
Una vez habilitado el inicio, el sistema queda listo para procesar las señales de entrada, como se muestra en la Figura 5.3.



**Figura 5.3:** Enable activado.

Fuente: Elaboración propia.

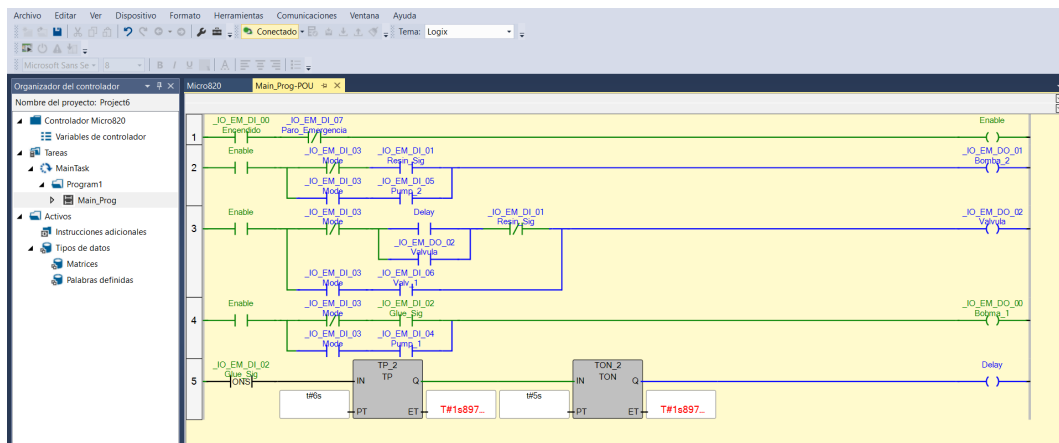
En cuanto el sistema identifica que el tanque del aditivo está vacío, procede a encender la bomba que se encarga de llenar el tanque, tal como se muestra en la Figura 5.4



**Figura 5.4:** Función de llenado de tanque de aditivo.

Fuente: Elaboración propia.

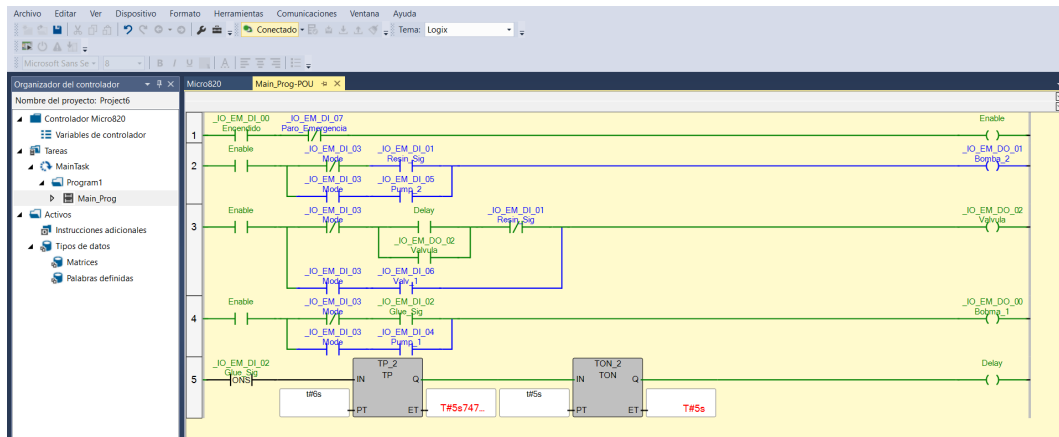
Cuando el tanque está lleno, el sistema permanece en espera hasta que el tanque dosificador requiera un nuevo bache de goma. Cuando esto ocurre, se inicia la carga de la goma y se activa el temporizador encargando de generar el delay entre el inicio de la descarga y el vaciado del tanque del aditivo, como se muestra en la Figura 5.5.



**Figura 5.5:** Función de llenado de tanque de goma.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez el delay es completado, se inicia la descarga del tanque de aditivo, esto se logra accionando la válvula de asiento, la cual, se queda enclavada hasta que el tanque de aditivo requiere una nueva recarga, como se muestra en la Figura 5.6.



**Figura 5.6:** Descarga de aditivo.

Fuente: Elaboración propia.

Ya cuando se requiere la recarga del tanque de aditivo, el sistema cierra la válvula de asiento, haciendo que se pueda llenar el tanque, mientras se sigue llenando el tanque dosificador con la nueva goma, tal como se muestra en la figura 5.7.

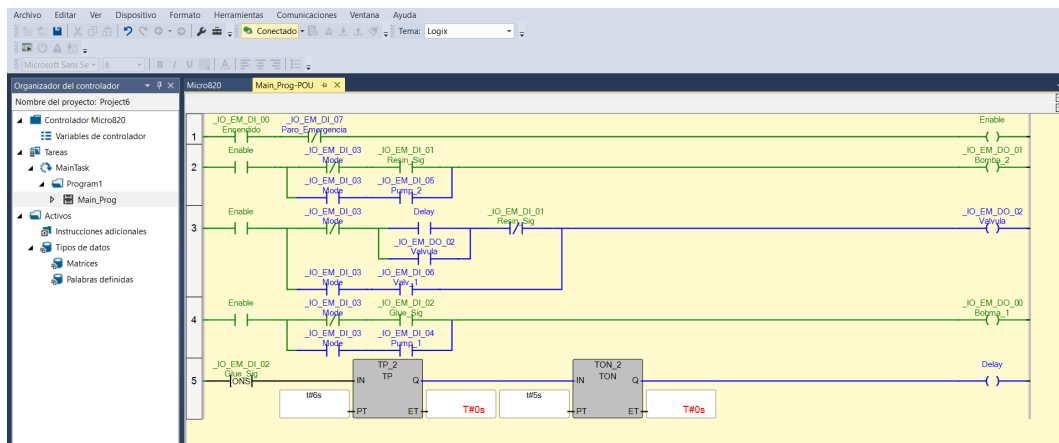


Figura 5.7: Rellenado de tanque de aditivo.

Fuente: Elaboración propia.

#### 5.4.4 Análisis del funcionamiento del control.

El análisis de las señales monitoreadas confirma que el sistema de control responde de manera coherente y sincronizada con las condiciones de operación. La lógica de enclavamiento garantiza que el ciclo de dosificación se ejecute únicamente cuando se detecta un nuevo lote de goma y permanezca inactivo mientras no se requiera una nueva carga.

El modo manual es útil para pruebas y mantenimiento, ya que permite activar cada actuador sin interferir con la lógica automática. Esta funcionalidad facilita la verificación de componentes, el drenaje de líneas y las tareas de calibración o limpieza.

#### 5.4.5 Conclusiones de la validación.

La validación del subsistema de control confirma el cumplimiento de las métricas establecidas en el diseño. El PLC Micro820 ejecuta de manera estable la lógica de control definida, sin requerir intervención del operador y manteniendo los enclavamientos necesarios para prevenir errores de secuencia o descargas múltiples. La arquitectura de control permite la operación en modo manual o automático, lo que garantiza la seguridad y la trazabilidad.

De este modo, se valida el cumplimiento de las necesidades N2, N4, N7, N8 y N11: automatización completa, precisión en la activación, prevención de errores de dosificación y protección del operador frente al contacto directo con el aditivo.

## 5.5 Análisis global de los resultados y cumplimiento de los objetivos.

Las pruebas realizadas permitieron validar el desempeño global del sistema dosificador automatizado, confirmando que las funciones físicas, electrónicas y de control operan conforme al diseño.

Cada validación abordó un aspecto esencial del sistema: la precisión de la dosificación, la integración con el circuito de goma y la confiabilidad del control programado. En conjunto, los resultados obtenidos demuestran que el sistema cumple con los objetivos técnicos establecidos.

### 5.5.1 Síntesis de resultados por subsistema.

La **Prueba 1** verificó la estabilidad del sistema de activación y la precisión en la dosificación del aditivo. Se obtuvo una desviación estándar de 4.02 mL respecto al volumen teórico de 1150 mL, lo que representa un error relativo del 0.14 %. El sistema mantuvo un tiempo promedio de descarga de 4,2 s, inferior al límite de diseño de 5 s, lo que confirma la confiabilidad de la bomba neumática y la repetibilidad del ciclo automático.

La **Prueba 2** validó la correcta integración de la función de admisión de goma en el sistema automatizado, confirmando que la activación de la bomba de transferencia responde correctamente a las señales de nivel y a las condiciones lógicas establecidas. El control del proceso no presentó falsos disparos ni retrasos y la secuencia se mantuvo estable tras múltiples ciclos.

La **Prueba 2B** verificó la compatibilidad física y funcional del nuevo sistema con la infraestructura existente. El diseño en paralelo permitió su instalación sin afectar el flujo de goma ni requerir modificaciones estructurales. El tanque dosificador y la bomba neumática se integraron de forma no invasiva, manteniendo la accesibilidad y permitiendo revertir el montaje si fuera necesario.

Finalmente, la **Prueba 3** validó el subsistema de control, confirmando la ejecución estable de la lógica programada en el PLC Micro820 en los modos automático y manual. La lógica de enclavamiento corrigió disparos múltiples y permitió un funcionamiento seguro, sincronizado

y trazable. El operador puede supervisar y controlar las señales desde el software *Connected Components Workbench*, lo que facilita la verificación y el mantenimiento del sistema.

### **5.5.2 Evaluación del cumplimiento de objetivos y métricas.**

A partir de los resultados obtenidos, se confirma el cumplimiento de los objetivos específicos y de las métricas establecidas en el diseño del sistema. La Tabla 5.5 resume la verificación de las métricas definidas en la Tabla 3.3, con base en las pruebas experimentales y observaciones realizadas en planta.

**Tabla 5.5:** Evaluación del cumplimiento de las métricas del sistema dosificador automatizado.

N°	Métrica evaluada	Evidencia de validación	Cumplimiento
M1	Dosificación automática sin intervención del operador.	Prueba 1	Cumple
M2	Activación automática al detectar ingreso de nuevo lote.	Prueba 1, 2 Y 3	Cumple
M3	Ajuste de cantidad de aditivo según formulación establecida.	Prueba 1	Cumple
M4	Error máximo de dosificación menor al 1 %.	Prueba 1	Cumple
M5	Mezcla homogénea sin retrasos en integración.	Prueba 1	Cumple
M6	Prevención de estancamientos o exposición solar del aditivo.	Prueba 2B	Cumple
M7	Inhibición de descarga cuando no hay flujo de goma.	Prueba 2 y 3	Cumple
M8	Prevención de desperdicio de aditivo tras ciclos no utilizados.	Prueba 2 y 3	Cumple
M9	Conservación del aditivo a temperatura ambiente y en sombra.	Prueba 2B	Cumple
M10	Facilidad de mantenimiento y limpieza del sistema.	Prueba 3	Cumple
M11	Registro y trazabilidad de los ciclos de dosificación.		Parcialmente cumple
M12	Consideración de propiedades físico-químicas del aditivo.	2B	Cumple
M13	Protección del operador contra contacto directo con el aditivo.	Diseño y pruebas funcionales	Cumple
M14	Compatibilidad con tanques y líneas existentes.	Prueba 2B	Cumple

### 5.5.3 Análisis integral del desempeño.

La integración de los resultados y el cumplimiento de las métricas permiten concluir que el sistema satisface los requisitos funcionales, operativos y de seguridad definidos. El desempeño observado en planta bajo condiciones reales demuestra que el diseño propuesto es viable, confiable y reproducible. Las pruebas confirman que el sistema:

- Dosifica el aditivo de manera automática, precisa y estable.
- Opera en sincronía con la demanda real del proceso de producción.
- Se integra físicamente sin alterar el sistema existente.
- Permite supervisión, control manual y mantenimiento simplificado.
- Evita errores de sobre- o subdosificación mediante enclavamientos lógicos.

### 5.5.4 Conclusiones del análisis global.

Las validaciones confirman que el sistema automatizado de dosificación de aditivo cumple con los objetivos generales y específicos del proyecto. La integración con el circuito de goma fue exitosa, la lógica de control garantiza la estabilidad operativa y la precisión alcanzada en la dosificación demuestra la efectividad del diseño. Los resultados respaldan la aplicabilidad industrial del sistema y su potencial para mejorar la consistencia del proceso, reducir el consumo de aditivo y eliminar la intervención del operador en tareas críticas.

## 5.6 Evaluación estadística de la mejora de la viscosidad.

### 5.6.1 Objetivo.

Verificar, mediante pruebas de hipótesis, si la automatización del sistema dosificador de aditivo produjo una mejora significativa en la estabilidad de la viscosidad de la goma, reduciendo su variabilidad y manteniendo un coeficiente de variación inferior al 5 %, conforme a los criterios de control del proceso.

### 5.6.2 Fundamento estadístico.

El procedimiento se basa en la metodología presentada por Walpole, Myers, Myers y Ye en el capítulo 10 del texto Probabilidad y Estadística para Ingenieros [62], específicamente en los apartados 10.5 y 10.10, que describen las pruebas de hipótesis para dos muestras y para varianzas, respectivamente.

Según Walpole (sección 10.5), cuando se comparan dos medias poblacionales independientes, la hipótesis nula general se expresa como:

$$H_0 : \mu_1 - \mu_2 = d_0$$

Y la alternativa puede ser bilateral o unilateral, dependiendo de si se busca demostrar una diferencia o una mejora direccional. Si las varianzas poblacionales son desconocidas pero iguales, el estadístico de prueba se obtiene mediante la prueba t agrupada:

$$t = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad \text{donde} \quad S_p^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

[62, pp. 343–344].

Asimismo, para comparar la dispersión de los procesos antes y después de la automatización, se utiliza la prueba F de dos varianzas [62], definida por:

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2}$$

Con hipótesis:

$$H_0 : \sigma_2^2 \geq \sigma_1^2 \quad \text{vs.} \quad H_1 : \sigma_2^2 < \sigma_1^2$$

Si  $F > F_\alpha(v_1, v_2)$ , se rechaza  $H_0$  y se concluye que la varianza del proceso nuevo es significativamente menor, indicando mayor estabilidad.

### 5.6.3 Metodología aplicada.

Se recolectaron 508 mediciones de viscosidad (s) antes de la automatización y 156 después, todas realizadas en condiciones reales de operación. Se formularon dos pruebas principales:

1. Prueba **F** unilateral para verificar la reducción de varianza ( $\sigma_D^2 < \sigma_A^2$ ).

2. Prueba **t** unilateral (muestras independientes) para determinar si la viscosidad promedio disminuyó ( $\mu_D < \mu_A$ ).

El nivel de significancia utilizado fue  $\alpha = 0.05$ . Complementariamente, se verificó que el coeficiente de variación posterior fuera menor al 5 %, umbral técnico de estabilidad del proceso.

#### 5.6.4 Resultados descriptivos.

**Tabla 5.6:** Resumen estadístico de la viscosidad antes y después de la automatización.

Condición	n	Media (s)	Desv. Est. (s)	CV (%)
Antes	508	36.93	8.40	22.75
Después	156	34.43	1.53	<b>4.45</b>

#### 5.6.5 Pruebas de hipótesis.

##### Prueba F — Reducción de variabilidad.

$$F = \frac{S_A^2}{S_D^2} = 30.09, \quad p < 10^{-16}$$

Dado que  $F$  supera el valor crítico para  $\alpha = 0.05$ , se rechaza  $H_0$ , lo que indica que la varianza del proceso nuevo es significativamente menor que la anterior.

##### Prueba t — Comparación de medias.

$$t = 6.37, \quad p = 1.88 \times 10^{-10}$$

Se rechaza  $H_0$ , lo que evidencia que la media de viscosidad disminuyó significativamente tras la automatización.

**Criterio de control.** El coeficiente de variación se redujo de 22.75 % a 4.45 %, lo que cumple con el criterio de estabilidad industrial  $CV < 5\%$ .

### 5.6.6 Conclusiones.

Siguiendo el método de Walpole para pruebas de hipótesis de dos muestras, se demuestra que la automatización del sistema dosificador produjo una reducción estadísticamente significativa tanto en la media como en la variabilidad de la viscosidad. El proceso presenta una mejora del 80,4 % en la estabilidad, alcanzando un comportamiento controlado y repetible. Por lo tanto, se confirma que el sistema diseñado cumple con el objetivo de asegurar la dosificación precisa del aditivo y una mayor homogeneidad del producto final.

## 5.7 Análisis financiero.

El análisis financiero del sistema dosificador automatizado tuvo como objetivo evaluar la rentabilidad de la inversión, considerando tanto los costos de adquisición como los beneficios económicos derivados de su implementación. Se examinaron los costos de inversión (CapEx), los ahorros mensuales generados por la reducción de cartón despegado y la disminución del tiempo operativo del personal, así como los indicadores financieros tradicionales: Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR).

### 5.7.1 Inversión inicial (CapEx).

La inversión inicial incluyó la adquisición de componentes eléctricos y neumáticos no disponibles en inventario, los cuales se detallan en la Tabla 5.7. Los demás materiales se reutilizaron a partir de activos existentes de la corporación.

**Tabla 5.7:** Detalle de inversión inicial del sistema dosificador.

Elemento	Costo (USD)
Controlador lógico programable (PLC)	375.28
Válvula de asiento	278.11
Bloque de conexión de válvulas	79.43
Gabinete de control	524.79
<b>Total de inversión (CapEx)</b>	<b>8 324.28</b>

### 5.7.2 Beneficios económicos.

Los beneficios económicos se determinaron a partir de dos fuentes principales:

- **Reducción del cartón despegado.** Se analizó la información histórica mensual de producción, identificándose una disminución significativa en los costos asociados a este defecto tras la implementación del sistema (octubre). El ahorro promedio mensual obtenido fue de **34 129.56 USD**.
- **Ahorro de mano de obra.** La automatización del proceso eliminó la necesidad de intervención del operador para aplicar el aditivo cada cinco minutos, lo que redujo aproximadamente 96 minutos de trabajo diarios. Este ahorro equivale a **173.20 USD por mes**.

El ahorro mensual total generado por la implementación asciende a **34 302.75 USD**.

### 5.7.3 Evaluación financiera.

La evaluación financiera del proyecto utilizó una tasa de descuento mensual del 12 %, correspondiente a la tasa promedio de oportunidad del mercado costarricense. Se calcularon el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) para un horizonte de 12 meses, según las siguientes expresiones:

$$VAN = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+i)^t} \quad (5.3)$$

$$0 = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad (5.4)$$

Donde  $CF_t$  representa los flujos netos de efectivo en el mes  $t$ ,  $i$  es la tasa de descuento mensual (0.12), y  $r$  la tasa interna de retorno.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5.8.

**Tabla 5.8:** Indicadores financieros del sistema dosificador (12 meses).

<b>Indicador</b>	<b>Valor</b>
Valor Actual Neto (VAN)	202 594.42 USD
Tasa Interna de Retorno (TIR)	27.00 % mensual

#### 5.7.4 Análisis e interpretación.

Los resultados financieros evidencian una recuperación de la inversión casi inmediata, considerando la relación entre la inversión inicial (8 324.28 USD) y el ahorro mensual promedio (34 302.75 USD). Un VAN positivo y elevado indica que el proyecto genera un retorno neto considerable incluso con una tasa de descuento alta, mientras que una TIR de 27 % mensual confirma una alta rentabilidad y un periodo de recuperación muy corto.

En términos prácticos, el sistema recupera su costo de implementación en menos de un mes de operación. Además, su impacto en la reducción de pérdidas por cartón despegado y en la eficiencia del personal refuerza su valor dentro de la estrategia de mejora continua de la planta.

# Capítulo 6

## Conclusiones y recomendaciones

### 6.1 Conclusiones.

- La implementación del sistema automatizado para la dosificación del aditivo anticoagulante resultó exitosa, permitiendo su integración completa en la línea de producción existente sin requerir modificaciones estructurales ni interrupciones del proceso. Las validaciones confirmaron que el ciclo de dosificación se ejecuta en menos de 5 segundos, con una variación mínima entre repeticiones, cumpliendo los criterios de precisión y estabilidad establecidos en el diseño. Asimismo, se verificó la lectura y el procesamiento adecuados de las señales de control en el PLC, sin retrasos ni fallos en la activación de la bomba neumática, lo que respalda la confiabilidad del sistema durante la operación continua.
- La comparación de las viscosidades antes y después de la implementación demostró una mejora significativa en la estabilidad del producto, con un coeficiente de variación inferior al 5 %, lo que confirma el cumplimiento del objetivo de control de calidad. Además, la automatización eliminó la intervención manual del operador en la dosificación, reduciendo 96 minutos diarios de trabajo operativo y mejorando las condiciones de seguridad del personal.
- La inversión total del sistema (8 324.28 USD) se recupera en menos de un mes de operación. El Valor Actual Neto (VAN) para un periodo anual fue de 202 594.42 USD y la Tasa Interna de Retorno (TIR) alcanzó un 27 % mensual, lo que evidencia una

alta rentabilidad. Finalmente, la metodología de Ulrich y Eppinger resultó adecuada para estructurar el diseño y su desarrollo, establecer métricas y validar de manera sistemática el cumplimiento de los objetivos funcionales.

## 6.2 Recomendaciones.

- Se recomienda incorporar sensores de medición continua de nivel y flujo para monitorear en tiempo real el desempeño del sistema, lo que facilitaría la detección temprana de desviaciones y mejoraría la trazabilidad de los ciclos de dosificación. Además, la integración de una interfaz HMI permitiría visualizar variables críticas del proceso y facilitar la operación manual durante actividades de mantenimiento o ajuste.
- Se recomienda implementar un registro automático de datos de operación para evaluar el rendimiento histórico, calcular indicadores de desempeño y detectar tendencias de variación. Además, la automatización de las rutinas de limpieza y purga aumentaría la disponibilidad del sistema y reduciría los tiempos asociados al mantenimiento preventivo.
- Finalmente, se recomienda replicar el sistema en otras líneas de dosificación o adaptarlo a diferentes aditivos, aprovechando su diseño modular y la compatibilidad con los tanques existentes. Esta estrategia permitiría una expansión progresiva del alcance de la automatización sin requerir modificaciones estructurales significativas.



- [7] K. Apmann, “Thermal conductivity and viscosity: Review on effects of base liquid, temperature, surfactant, concentration and nanoparticles,” *Materials (Basel)*, 2021, [En línea]. Disponible en: PubMed Central. [Accedido: 24-ago-2025].
- [8] G. J. Van Wylen, R. E. Sonntag, and C. Borgnakke, *Fundamentals of Classical Thermodynamics*, 9th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2017.
- [9] J. Shamuratov, “The viscosity of liquids, methods for determining viscosity and classification of modern viscometers,” *Scientific and Technical Journal of Namangan Institute of Engineering and Technology*, vol. 7, pp. 95–102, 07 2022.
- [10] R. Durairaj, N. N. Ekere, and B. Salam. Thixotropy flow behaviour of solder and conductive adhesive pastes. (2004) [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1023/B:JMSE.0000038923.62923.1e>. [Accedido: 23-ago-2025].
- [11] Fumed silica controls rheology of adhesives and sealants. (2000) [En línea]. Disponible en: <https://www.adhesivesmag.com/articles/85787-fumed-silica-controls-rheology-of-adhesives-and-sealants> [Accedido: 24-ago-2025].
- [12] A. F. Ismail *et al.*, “Effect of a multifunctional additive on curing characteristics and mechanical properties of carbon blacks filled natural rubber compounds,” *[En línea]*, Jun. 2025, [En línea]. Disponible en: ResearchGate. [Accedido: 24-ago-2025].
- [13] Y. Torres *et al.*, “Classification and quantification of human error in manual assembly processes,” *Applied Sciences*, vol. 11, p. 749, 2021, [En línea]. Acceso abierto. [Accedido: 24-ago-2025].
- [14] . Kavaliauskas, G. Blažiūnas, I. Šajev, A. Iljinas, and D. Gimžauskaitė. Development and optimization of an automated industrial wastewater treatment system using plc and lstm neural network. (2025) [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/app15168990>. [Accedido: 24-ago-2025].
- [15] Level sensors – float type (contact type, moving parts used). (2024) [En línea]. Disponible en: <https://www.keyence.com/products/process/level/> [Accedido: 24-ago-2025].

- [16] T. S. R. Pereira, T. P. de Carvalho, T. A. Mendes, and K. T. M. Formiga. Evaluation of water level in flowing channels using ultrasonic sensors. (2022) [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su14095512>. [Accedido: 23-ago-2025].
- [17] Y. Ren, B. Luo, X. Feng, Z. Feng, Y. Song, and F. Yan. Capacitive and non-contact liquid level detection sensor based on interdigitated electrodes with flexible substrate. (2024) [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/electronics13112228>. [Accedido: 23-ago-2025].
- [18] R. Casanella, O. Casas, and R. Pallas-Areny. Continuous liquid level measurement using a linear electrode array. (2007) [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/18/7/010>. [Accedido: 23-ago-2025].
- [19] J. O. Bird and P. J. Chivers. Measurement of fluid flow. (1993) [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-1683-6.50052-7>. [Accedido: 24-ago-2025].
- [20] M. Al-Khamis, A. Al-Nojaim, and M. Al-Marhoun. Performance evaluation of coriolis mass flowmeters. (2002) [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1115/1.1467644>. [Accedido: 24-ago-2025].
- [21] S. Guo, Z. Yang, F. Wang, N. Zhao, and X. Li. Optimal design of wide viscosity range turbine flow sensor based on flow field analysis. (2021) [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2021.101909>. [Accedido: 24-ago-2025].
- [22] S. J. Rupitsch. Simulation of piezoelectric sensor and actuator devices. (2019) [En línea]. Disponible en: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-12950-5\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-12950-5_3). [Accedido: 24-ago-2025].
- [23] B. Ganev, D. Nikolov, and M. B. Marinov. Performance evaluation of mems pressure sensors. (2020) [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/ELECTRONICA50456.2020.9305085>. [Accedido: 24-ago-2025].
- [24] J. Priest. Temperature and its measurement. (2004) [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B0-12-176480-X/00082-6>. [Accedido: 24-ago-2025].
- [25] D. Pollock. Thermocouples: theory and properties. (2018) [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1201/9781351080536>. [Accedido: 24-ago-2025].

- [26] E. Düzgün and G. Şefkat. The design and analysis of a proportional solenoid with experimental validation of static and dynamic behavior. (2024) [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/app142411990>. [Accedido: 24-ago-2025].
- [27] H. Du, W. Liu, X. Bian, and W. Xiong. Energy-saving for industrial pneumatic actuation systems by exhausted air reuse based on a constant pressure elastic accumulator. (2022) [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su14063535>. [Accedido: 24-ago-2025].
- [28] M.-E. Brett, S. Zhao, J. Stoia, and D. Eddington. Controlling flow in microfluidic channels with a manually actuated pin valve. (2011) [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10544-011-9533-7>. [Accedido: 24-ago-2025].
- [29] H.-n. Zhang, G.-f. Wang, and Q.-n. Zhao. Design optimization of V-sector ball valve core. (2019) [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/267/3/032076>. [Accedido: 24-ago-2025].
- [30] S.-W. Choi, H.-S. Seo, and H.-S. Kim. Analysis of flow characteristics and effects of turbulence models for the butterfly valve. (2021) [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/app11146319>. [Accedido: 24-ago-2025].
- [31] V. Slama, D. Simurda, and P. Kollross. Valve seat angle influence on losses in valves for steam turbines. (2023) [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202338300019>. [Accedido: 24-ago-2025].
- [32] F. Meng, Z. Shi, and Y. Song. A novel fault diagnosis strategy for diaphragm pumps based on signal demodulation and PCA-ResNet. (2024) [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/s24051578>. [Accedido: 24-ago-2025].
- [33] B. Lal and Dr. Deshmukh. Performance analysis of centrifugal pump at different operating mode. (2018) [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.24113/ijoscience.v4i11.170>. [Accedido: 24-ago-2025].
- [34] A. Malandrucolo. An introduction to stainless steels. (2024) [En línea]. Disponible en: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-68744-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-031-68744-0_1). [Accedido: 24-ago-2025].

- [35] A. J. Sedriks. Corrosion of stainless steels. (1996) [En línea]. Disponible en: <https://www.wiley.com/en-us/Corrosion+of+Stainless+Steels%2C+2nd+Edition-p-9780471155682>. [Accedido: 24-ago-2025].
- [36] G. Wypych. Handbook of polymers. 2nd ed. (2016) [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/C2015-0-00423-9>. [Accedido: 24-ago-2025].
- [37] T. A. Osswald and G. Menges. Material science of polymers for engineers. 3rd ed. (2012) [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3139/9781569905241.fm>. [Accedido: 24-ago-2025].
- [38] H. B. Kief and H. A. Roschiwal. PLCs: programmable logic controllers. (2013) [En línea]. Disponible en: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071799485/chapter/chapter7>. [Accedido: 24-ago-2025].
- [39] B. Hellman. Top PLC brands ranked: features, costs, and benefits. (2025) [En línea]. Disponible en: <https://industrialautomationco.com/blogs/news/top-plc-brands-ranked-features-costs-and-benefits>. [Accedido: 23-ago-2025].
- [40] F. Onaifo, A. Okandeji, U. Essien, O. Folorunsho, A. Oyedeji, and O. Abolade. Comparison of the reliability of programmable logic controller and electromagnetic relay control in industrial production line. (2019) [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.4314/njt.v38i4.28>. [Accedido: 24-ago-2025].
- [41] V. Gandhi and J. Singh. Comparative analysis of existing latest microcontroller development boards. (2019) [En línea]. Disponible en: [https://doi.org/10.1007/978-981-13-5802-9\\_88](https://doi.org/10.1007/978-981-13-5802-9_88). [Accedido: 24-ago-2025].
- [42] J. D. Irwin and R. M. Nelms. Basic engineering circuit analysis. 12th ed. (2020) [En línea]. Disponible en: <https://www.wiley.com/en-us/Basic+Engineering+Circuit+Analysis%2C+12th+Edition-p-9781119502012>. [Accedido: 24-ago-2025].
- [43] J. G. Proakis and D. G. Manolakis. Digital signal processing. (2007) [En línea]. Disponible en: <https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/digital-signal-processing/P200000002523/9780131873742>. [Accedido: 24-ago-2025].

- [44] Cyngn, Inc. Human-machine interface (HMI) in factory automation: what you need to know. (2024) [En línea]. Disponible en: <https://www.cyngn.com/blog/human-machine-interface-hmi-in-factory-automation-what-you-need-to-know>. [Accedido: 24-ago-2025].
- [45] N. Yemelin. Improving the industrial safety management system at enterprises with chemically hazardous sites. (2024) [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jnlssr.2024.06.005>. [Accedido: 24-ago-2025].
- [46] International Electrotechnical Commission. IEC 60204-1: safety of machinery - electrical equipment of machines - part 1: general requirements. (2016) [En línea]. Disponible en: <https://webstore.iec.ch/publication/26641>. [Accedido: 24-ago-2025].
- [47] Watson-Marlow Fluid Technology Group. Bomba peristáltica Serie 520. Ficha técnica, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.wmfts.com/en/flexicon/table-top-filling-machines/520-series-dispensing-pumps/>. [Accedido: 14-sep-2025].
- [48] Bürkert. Electroválvula Tipo 6213. Datasheet, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.burkert.com/en/type/6213>. [Accedido: 14-sep-2025].
- [49] SEKO. Tekna Evo Series - Dosing Pumps. Catálogo técnico, 2023. [En línea]. Disponible en: [http://seko.com.tr/PDF\\_TeknaEVO\\_Series.pdf](http://seko.com.tr/PDF_TeknaEVO_Series.pdf). [Accedido: 14-sep-2025].
- [50] Vogelsang GmbH & Co. KG. VX Series Rotary Lobe Pumps. Manual técnico, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.vogelsang.info/es/segmentos/aguas-residuales/caso-de-exito/bomba-lobular-rotativa-rendimiento-mejorado-de-la-bomba-serie-vx-edar-del-norte-de-alemania>. [Accedido: 14-sep-2025].
- [51] GF Piping Systems. 546 Pro Series Ball Valves. Product Documentation, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.gfps.com/en-mx/services/search-results.html?query=546+Pro+Series+Ball+Valves&sort=relevance+desc&tab=products>. [Accedido: 14-sep-2025].
- [52] Vega Grieshaber KG. VEGAPULS C 23 Radar Level Sensor. Datasheet, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.vega.com/en-us/products/product-catalog/level-radar/vegapuls-c-23>. [Accedido: 14-sep-2025].

- [53] Schneider Electric. Zelio Logic SR3 Smart Relays. Hoja de producto, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.se.com/us/en/product/SR3B261BD/modular-smart-relay-zelio-logic-sr2-sr3-26-io-24v-dc-clock-display-10-relay-outputs/>. [Accedido: 14-sep-2025].
- [54] BeagleBoard.org. BeagleBone Black Industrial. Ficha de producto, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.beagleboard.org/boards/beaglebone-black-industrial>. [Accedido: 14-sep-2025].
- [55] IDEC Corporation. FC6A MicroSmart Programmable Logic Controllers. Catálogo, 2023. [En línea]. Disponible en: [https://us.idec.com/idec-us/en/USD/Programmable-Logic-Controller/Micro-PLC/FC6A-MicroSmart-PLC/c/MicroSmart\\_FC6A?page=1](https://us.idec.com/idec-us/en/USD/Programmable-Logic-Controller/Micro-PLC/FC6A-MicroSmart-PLC/c/MicroSmart_FC6A?page=1). [Accedido: 14-sep-2025].
- [56] Opto22. G4PB8H Digital I/O System. Technical Manual, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.opto22.com/products/g4pb8h>. [Accedido: 14-sep-2025].
- [57] WEG. Contactor Modular CWC0. Ficha técnica, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.weg.net/catalog/weg/CA/es/search?text=CWC0>. [Accedido: 14-sep-2025].
- [58] Phoenix Contact. MINI MCR Analog Signal Conditioners. Hoja técnica, 2023. [En línea]. Disponible en: [https://www.phoenixcontact.com/global-search/search?\\_locale=es-CL&\\_realm=cl&t=knowledgebase&q=MINI+MCR+Analog+Signal+Conditioners](https://www.phoenixcontact.com/global-search/search?_locale=es-CL&_realm=cl&t=knowledgebase&q=MINI+MCR+Analog+Signal+Conditioners). [Accedido: 14-sep-2025].
- [59] Kenics Static Mixers. KMX-V Vortex Mixing Elements. Brochure, 2022. [En línea]. Disponible en: [https://assets.nov.com/NCP4N68N/at/qed4zv-a3zqkg-ez3c19/Kenics\\_Bulletin\\_800\\_v03.pdf](https://assets.nov.com/NCP4N68N/at/qed4zv-a3zqkg-ez3c19/Kenics_Bulletin_800_v03.pdf). [Accedido: 14-sep-2025].
- [60] Koflo Mixing Technologies. Koflo Blade™ Static Mixers. Koflo Corporation, 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.koflo.com/static-mixers.html>. [Accedido: 14-sep-2025].
- [61] ARO (Ingersoll Rand). IRM100 Pneumatic Agitator. Datasheet, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.arozone.com/en/?search=IRM100+>. [Accedido: 14-sep-2025].
- [62] R. E. Walpole, R. H. Myers, S. L. Myers, and K. Ye, *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*, 9. ed., Pearson Educación, Ciudad de México, 2012.

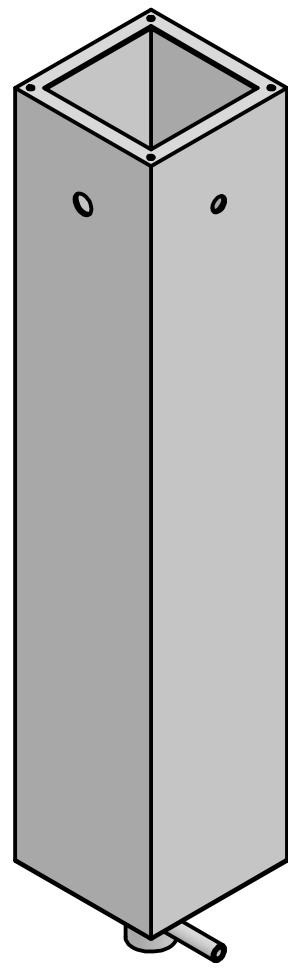
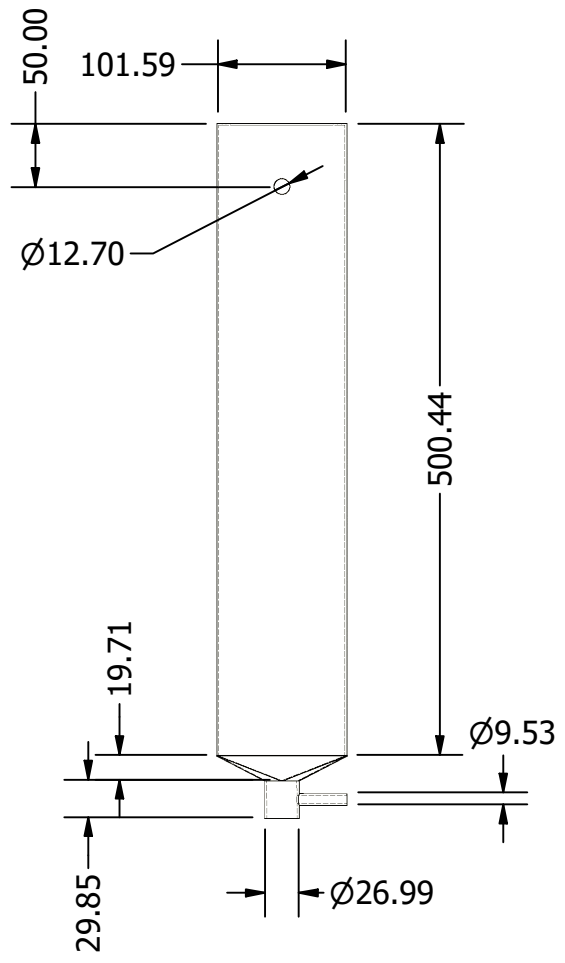
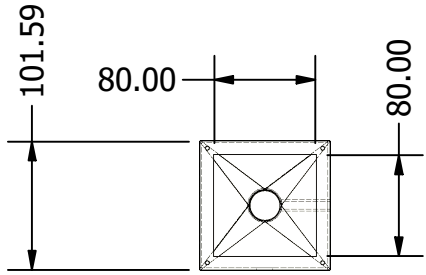
- [63] HarperLove Adhesives Corporation. Multibond LA™ Hoja de Seguridad. Charlotte, NC, EE.UU.: HarperLove Adhesives Corporation, 2020. [En línea]. Disponible bajo solicitud interna. [Accedido: 31-ago-2025].
- [64] ASTM International. *ASTM D1785 – Standard Specification for Poly(Vinyl Chloride) (PVC) Plastic Pipe, Schedules 40, 80, and 120*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM, reapproved 2024.
- [65] ASTM International. *ASTM A240/A240M – Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM, reapproved 2024.
- [66] Festo AG & Co. KG. Data sheet – VUVS-L25-M52-MD-G14-F8. 2022. [En línea]. Disponible en: [https://ftp.festo.com/public/PNEUMATIC/SOFTWARE\\_SERVICE/DataSheet/EN\\_GB/575509.pdf](https://ftp.festo.com/public/PNEUMATIC/SOFTWARE_SERVICE/DataSheet/EN_GB/575509.pdf). [Accedido: 1-sep-2025].
- [67] Festo AG & Co. KG. Technical data – VZXA-B-TS7-3/4"-M2-B. 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.festo.com/media/catalog/203952\\_documentation.pdf](https://www.festo.com/media/catalog/203952_documentation.pdf). [Accedido: 1-sep-2025].
- [68] Finder. 70.01 - Relé de nivel para líquidos conductivos. [En línea]. Disponible en: <https://www.findernet.com/es/worldwide/products/series/70/type/7001>. [Accedido: 22-oct-2025].
- [69] Micro controle, “Relé con alarma por nivel mínimo para depósito – RCN 101 DEP.” [En línea]. Disponible en: <https://www.microcontrole.es/productos/rel-es-electronicos/rel-es-de-control-de-nivel/rele-con-alarma-por-nivel-minimo-rcn-101-dep/>. [Accedido: 04-nov-2025].
- [70] Rockwell Automation. Allen-Bradley Micro820 Programmable Controller, catalog 2080-LC20-20QWB. Product Datasheet, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://prdscdnstorage.blob.core.windows.net/techdatasheets/2080LC2020QWB-88398-datasheet.pdf>. [Accedido: 02-sep-2025].
- [71] Rockwell Automation. Micro800 Digital Input Plug-in Module 2080-IQ4 (4-point). Wiring Diagram, enero 2024. [En línea]. Disponible en: <https://literature>.

- [rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wd/2080-wd011c-en-p.pdf](https://rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wd/2080-wd011c-en-p.pdf). [Accedido: 02-sep-2025].
- [72] Rockwell Automation. Micro800 Digital Relay Output Plug-in Module 2080-OW4I (4-point). Wiring Diagram, enero 2024. [En línea]. Disponible en: <https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wd/2080-wd010d-en-p.pdf>. [Accedido: 02-sep-2025].
- [73] ASTM International, “ASTM D4212-22: Standard Test Method for Viscosity by Dip-Type Viscosity Cups,” West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2022.
- [74] ARO Pumps, “Operator’s Manual PD05P-XXX-XXX-B (EN).” [En línea]. Disponible en: <https://aro-pumps.co.uk/sites/default/files/2019-01/PD05P-XXX-XXX-B-EN.pdf>. [Accedido: 04-nov-2025].
- [75] PipeFlow.com. Pipe Roughness. *Pipe Flow – Pipe Pressure Drop Calculations*, 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.pipeflow.com/pipe-pressure-drop-calculations/pipe-roughness>. [Accedido: 03-sep-2025].
- [76] Engineering ToolBox. Pipe and Tube System Components – Minor (Dynamic) Loss Coefficients. *EngineeringToolBox.com*, 2005. [En línea]. Disponible en: [https://www.engineeringtoolbox.com/minor-loss-coefficients-pipes-d\\_626.html](https://www.engineeringtoolbox.com/minor-loss-coefficients-pipes-d_626.html). [Accedido: 03-sep-2025].

# Apéndice A

## Planos mecánicos

A continuación, se presenta el plano mecánico del sistema dosificador; en este se detallan la geometría, dimensiones y características constructivas de los componentes principales del tanque de aditivo y su estructura de soporte. En estos planos se identifican elementos como el cuerpo del tanque, la tapa, los brazos de soporte laterales y las conexiones de acople para la línea de conducción, así como su relación dimensional y la forma en que se integran en el ensamble general del sistema. Estos detalles permiten visualizar la configuración estructural, las tolerancias, las uniones y los accesorios asociados al montaje mecánico, y sirven como referencia directa para la fabricación, la inspección y el ensamblaje de cada pieza del sistema.



B

B

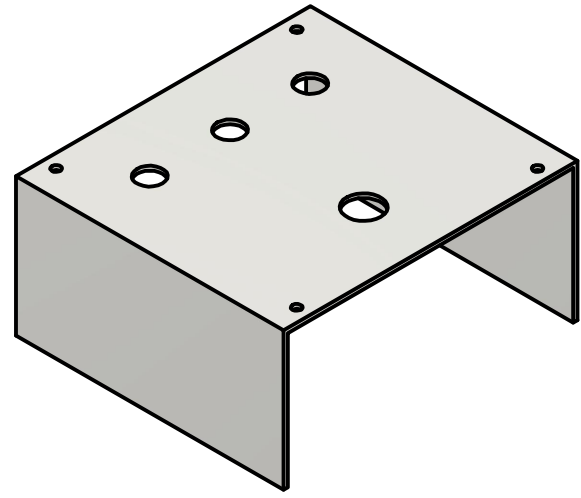
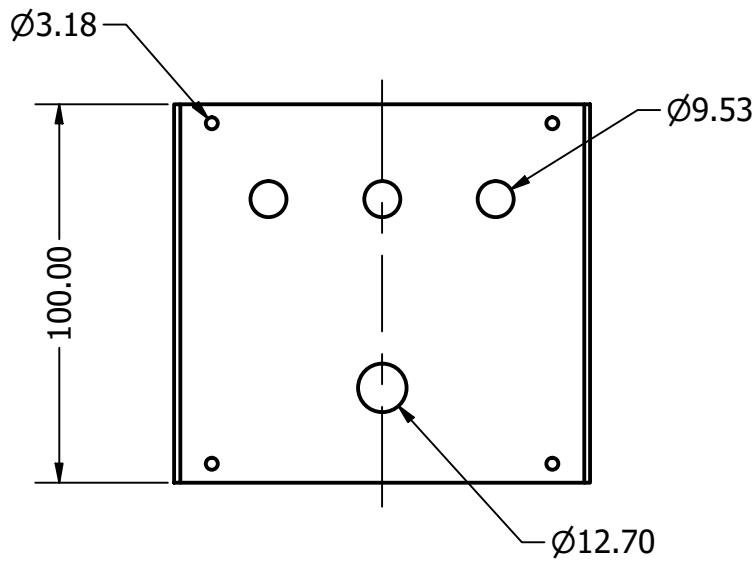
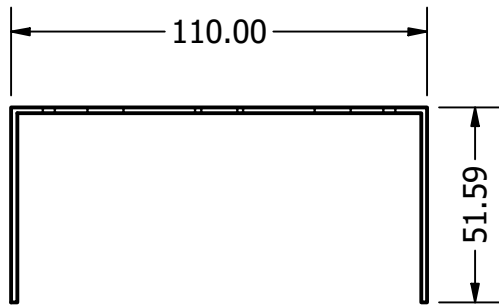
A

A

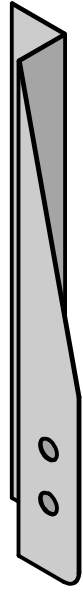
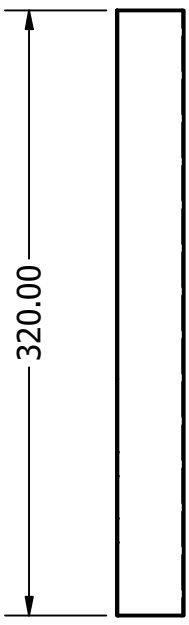
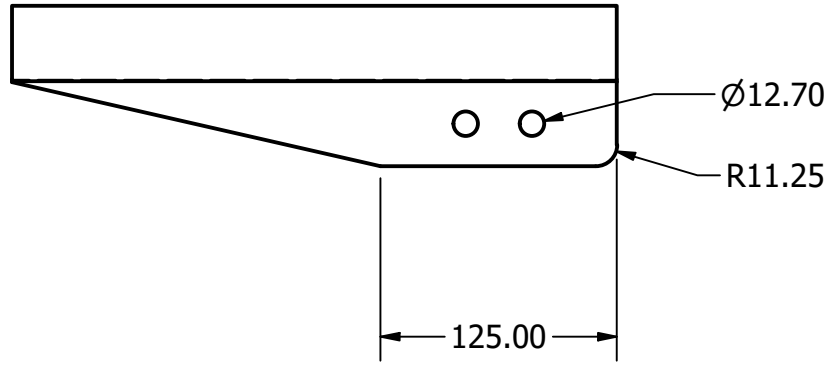
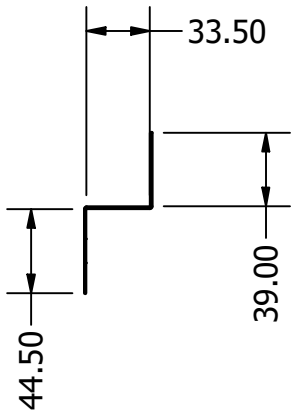
DRAWN	Y. ELIZONDO	26/10/2025	Instituto tecnológico de Costa Rica			
CHECKED	Y. ELIZONDO	26/10/2025	TITLE			
QA			Proyecto final de graduación			
MFG			SIZE	DWG NO	REV	
APPROVED			A	Cuerpo tanque de aditivo	1	
			SCALE	1 / 4	SHEET 1 OF 7	

2

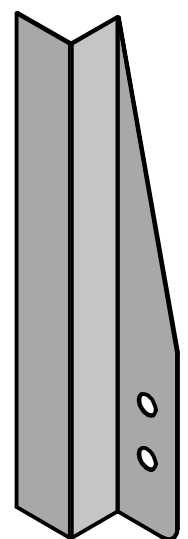
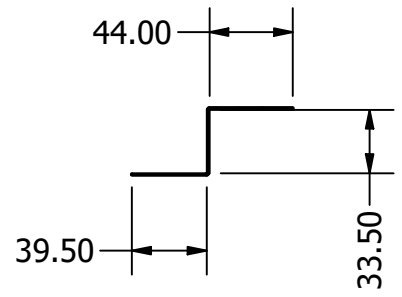
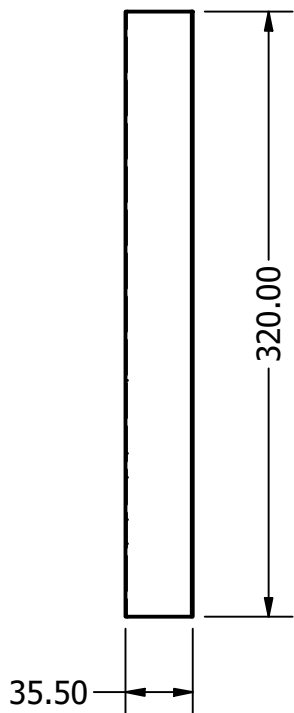
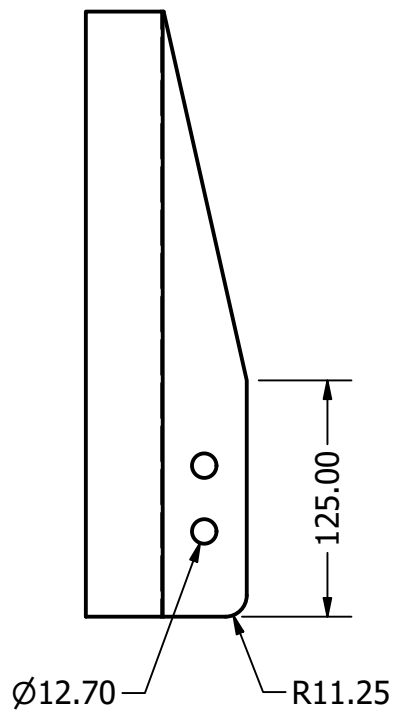
1



DRAWN Y. ELIZONDO		26/10/2025		Instituto tecnológico de Costa Rica				
CHECKED Y. ELIZONDO		26/10/2025						TITLE
QA				Proyecto final de graduación				
MFG				SIZE				
APPROVED				A		DWG NO		REV
				1 / 2		Tapa		1
				SCALE			SHEET 2 OF 7	
2				1 / 2			1	



DRAWN Y. ELIZONDO		26/10/2025		Instituto tecnológico de Costa Rica			
CHECKED Y. ELIZONDO		26/10/2025					
QA				TITLE			
MFG				Proyecto final de graduación			
APPROVED							
		SIZE		DWG NO		REV	
		A		Brazo derecho		1	
		SCALE	1 / 4	SHEET 3 OF 7			



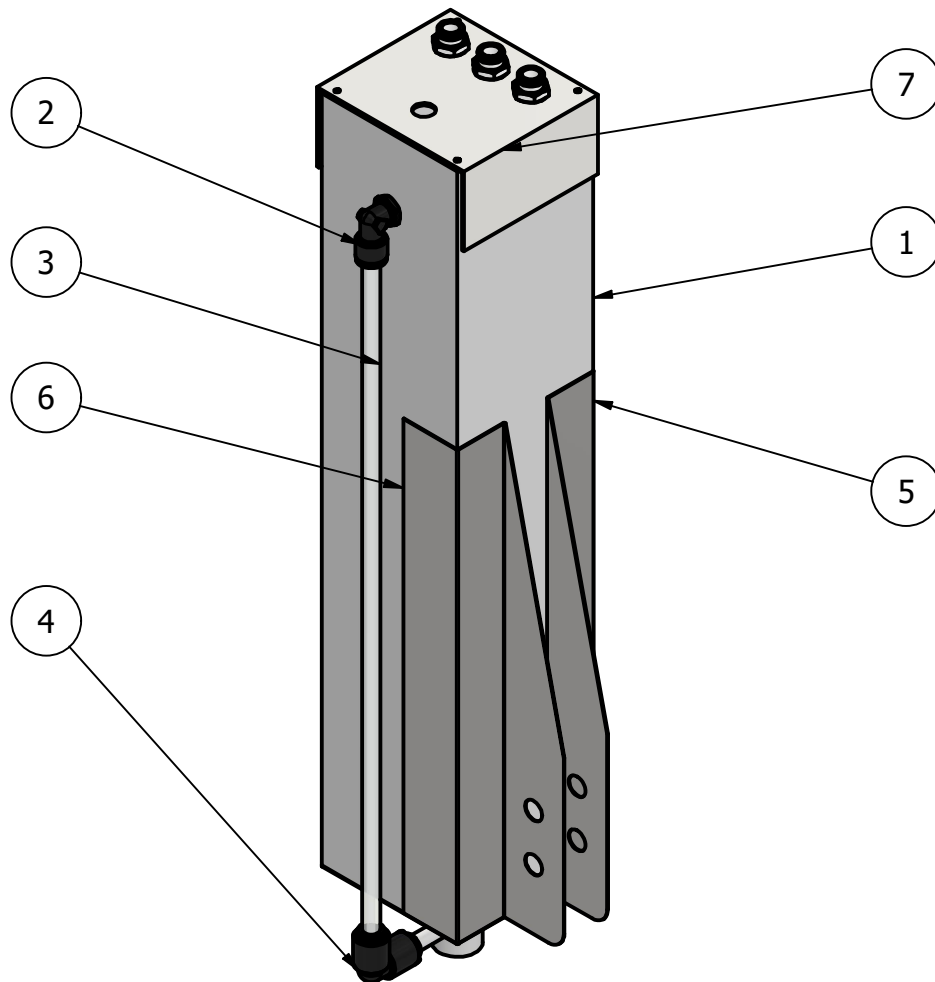
DRAWN Y. ELIZONDO		26/10/2025		Instituto tecnológico de Costa Rica				
CHECKED Y. ELIZONDO		26/10/2025						TITLE Proyecto final de graduación
QA								
MFG								
APPROVED				SIZE <b>A</b>		DWG NO Brazo Izquierdo		REV 1
		SCALE 1 / 4		SHEET 4 OF 7				

2

1

## PARTS LIST

ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	Cuerpo	
2	1	7699N25	Universal-Thread Push-to-Connect Tube Fitting
3	1	5233K54	Clear Masterkleer Soft PVC Plastic Tubing
4	1	Codo Fitting	Push-to-Connect Fitting
5	1	Brazo der	
6	1	Brazo izq	
7	1	Tapa completa	



DRAWN

Y. ELIZONDO

26/10/2025

CHECKED

Y. ELIZONDO

26/10/2025

QA

MFG

APPROVED

Instituto tecnológico de Costa Rica

TITLE

Proyecto final de graduación

SIZE

A

DWG NO

Ensamble general

REV

1

SCALE

1 / 4

SHEET 5 OF 7

2

1

2

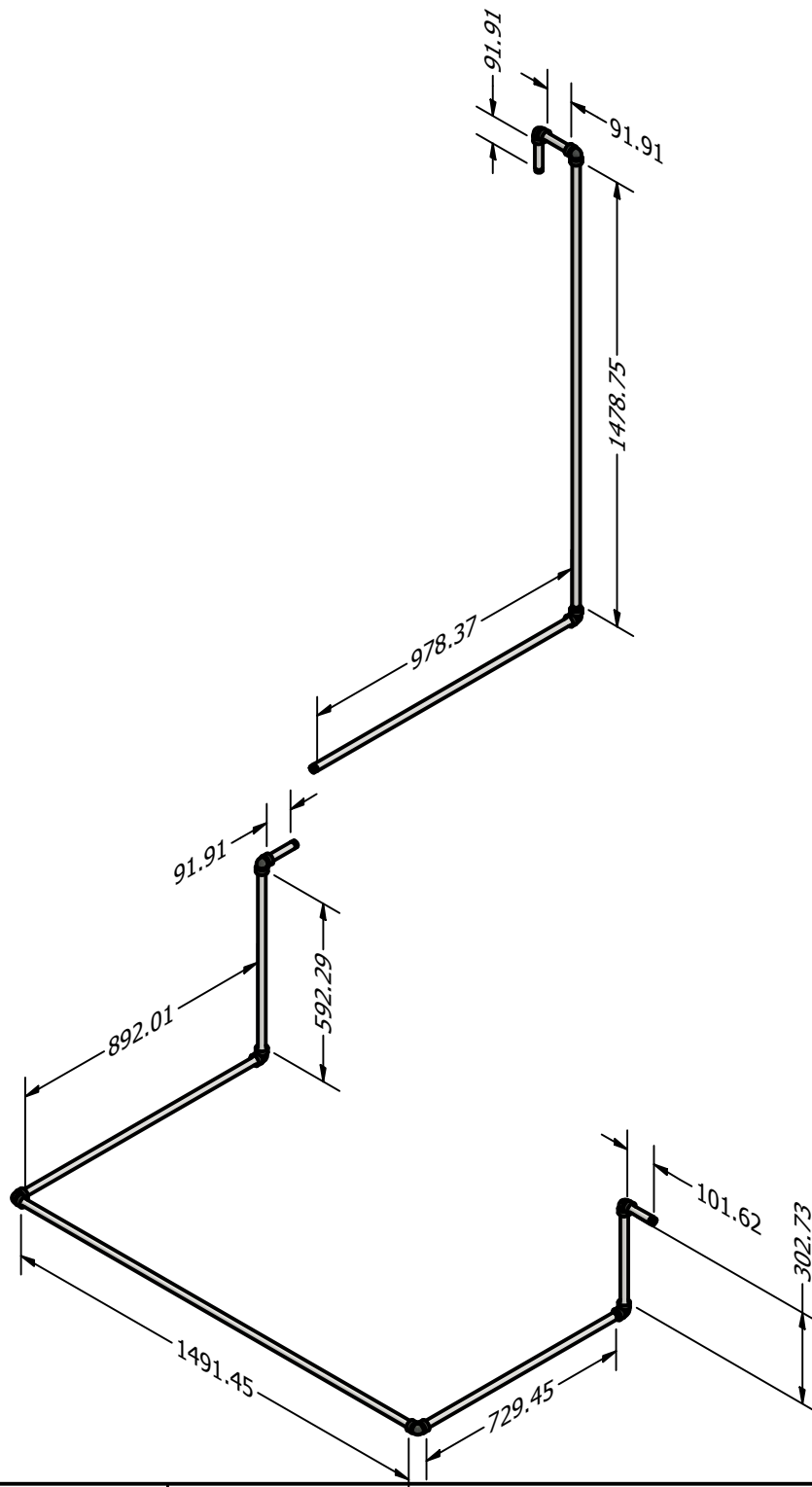
1

B

B

A

A



DRAWN	26/10/2025	Instituto tecnológico de Costa Rica		
Y. ELIZONDO	26/10/2025			
CHECKED				
Y. ELIZONDO				
QA				
MFG		TITLE		
APPROVED		Proyecto final de graduación		
		SIZE	DWG NO	REV
		A	Diagrama de tuberías	1

SCALE 0,05 : 1		SHEET 6 OF 7	
----------------	--	--------------	--

2

1

1

2

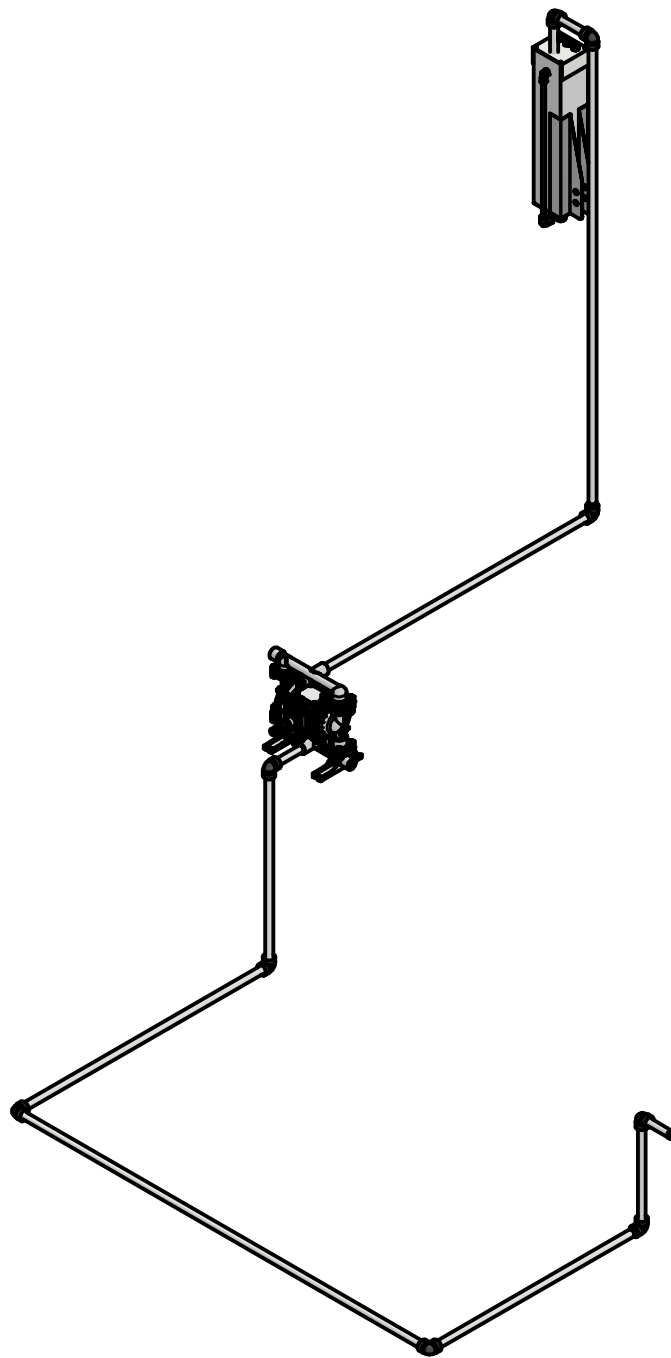
1

B

B

A

A



DRAWN		Instituto tecnológico de Costa Rica		
Y. ELIZONDO	26/10/2025			
CHECKED				
Y. ELIZONDO	26/10/2025			
QA				
MFG		Proyecto final de graduación		
APPROVED				
		SIZE	DWG NO	REV
		A	Ensamble general del sistema dosificador	1

SCALE	0,05 : 1	SHEET 7 OF 7
-------	----------	--------------

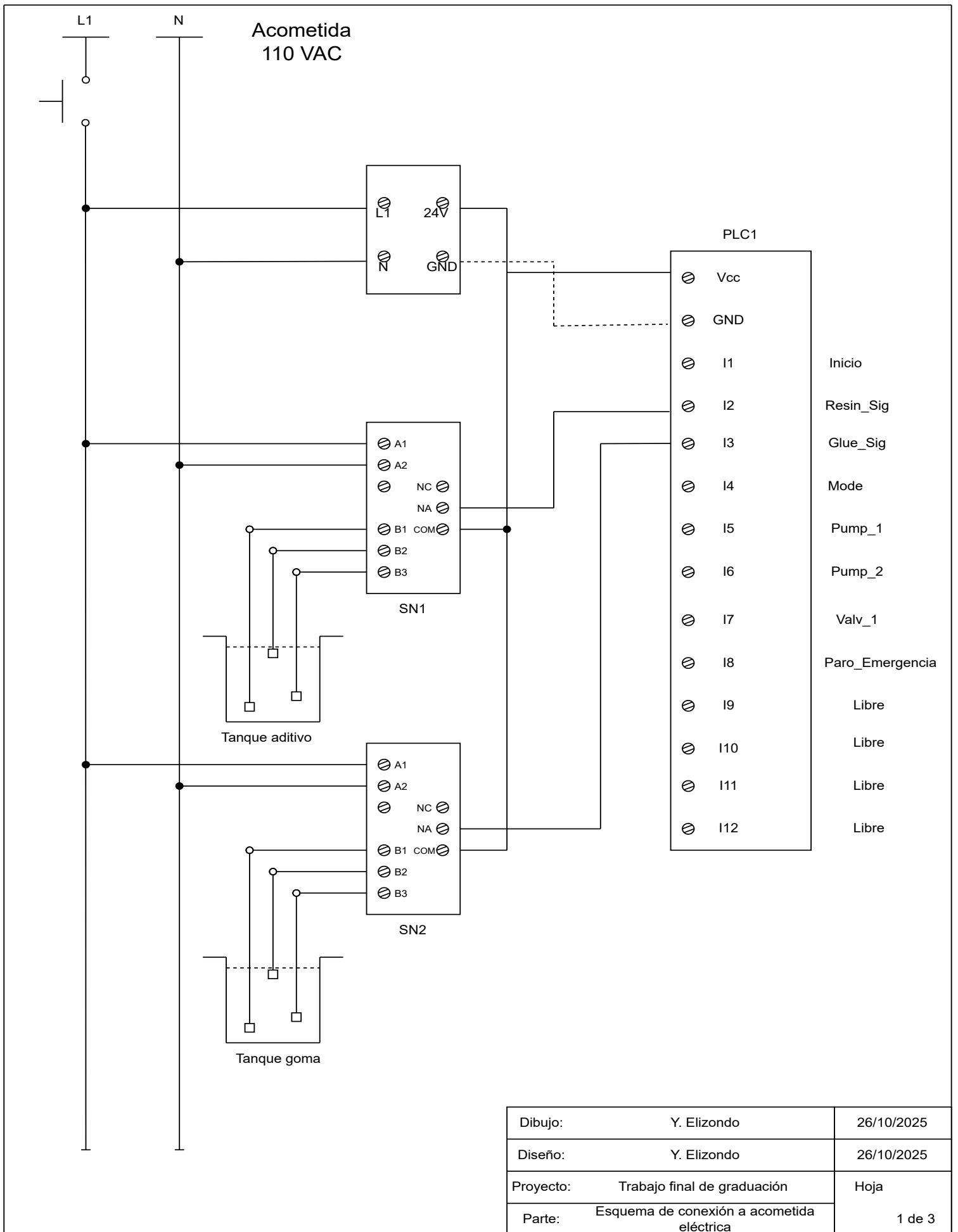
2

1

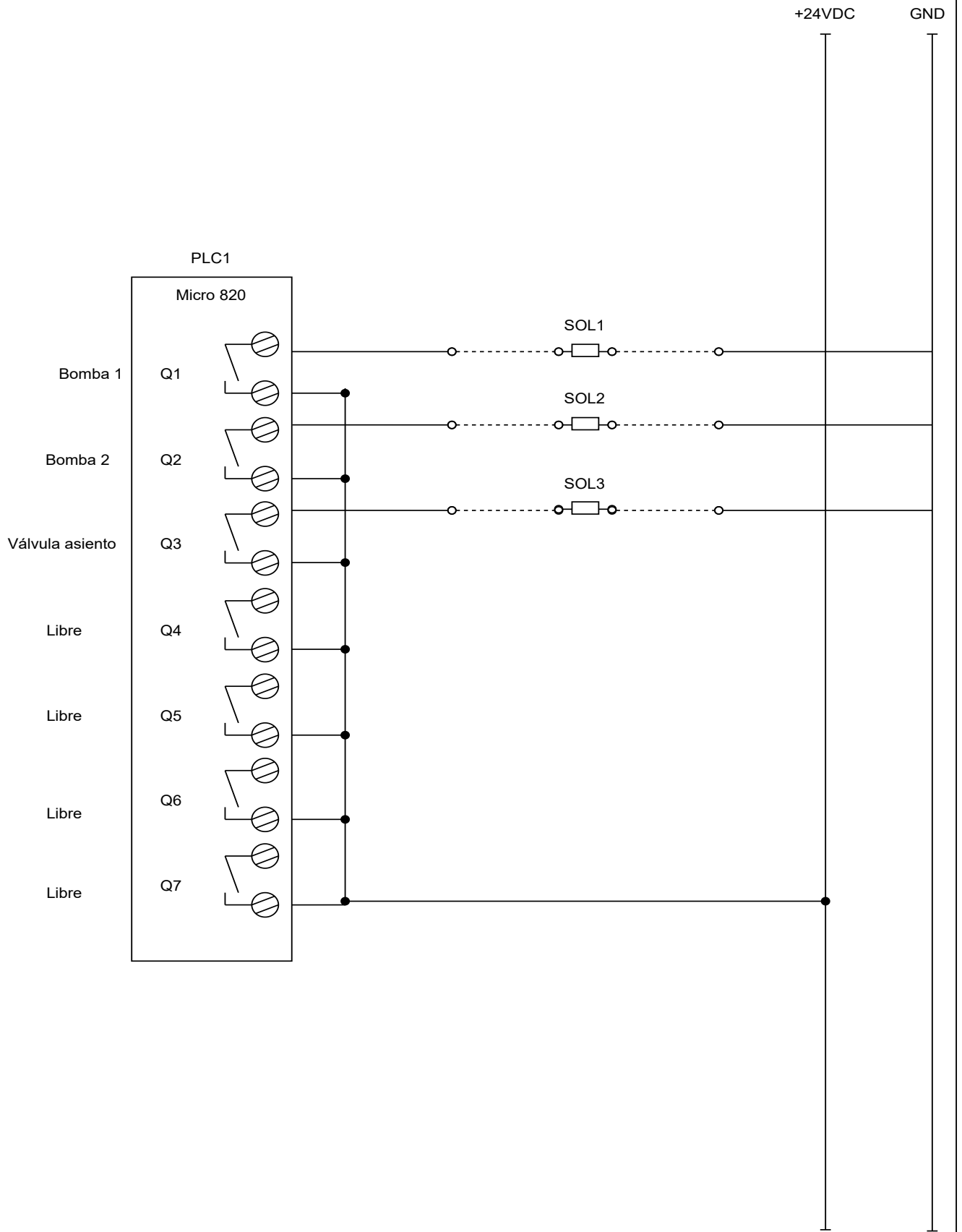
# Apéndice B

## Planos Eléctricos

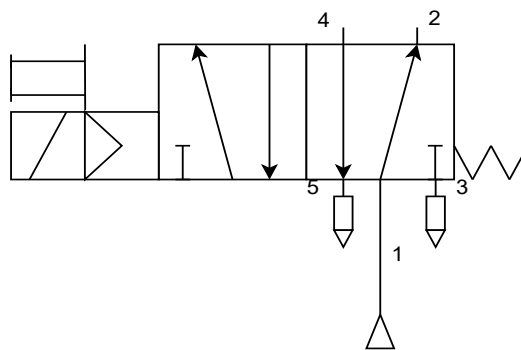
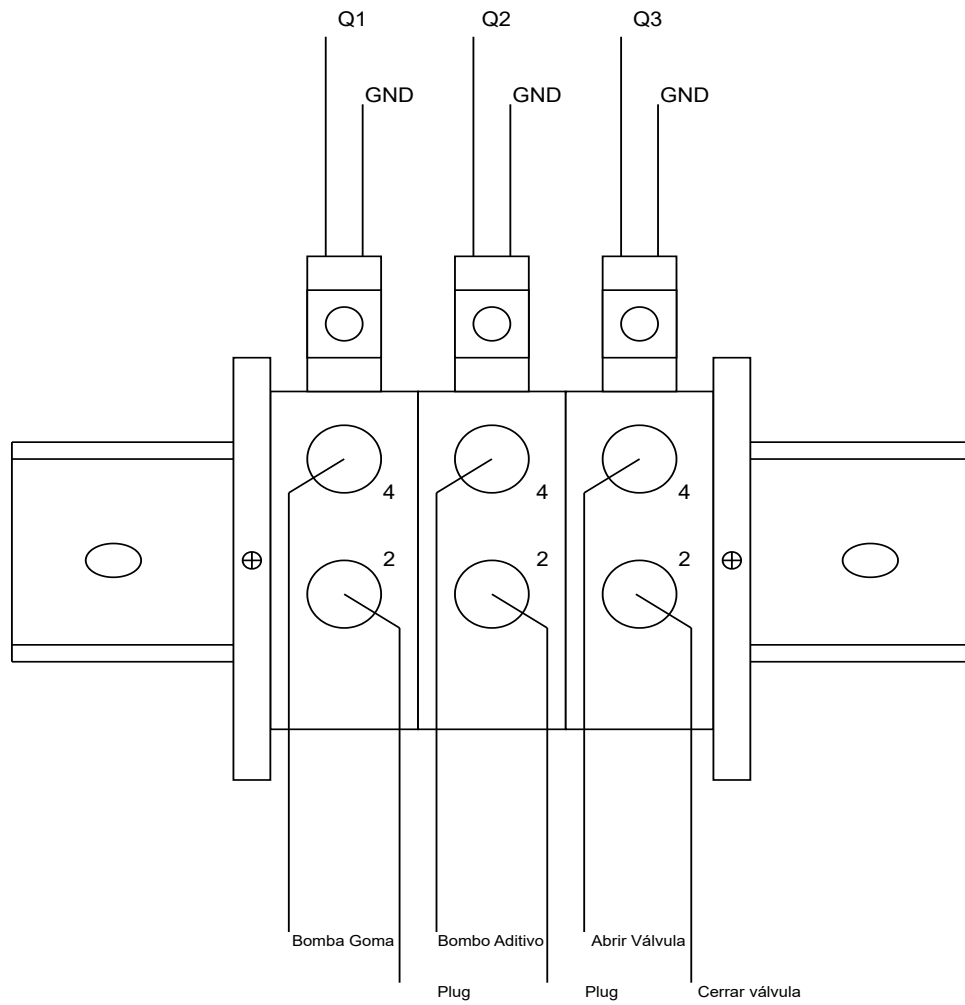
A continuación, se presenta el plano eléctrico de control del sistema dosificador automatizado, el cual muestra la interconexión entre los distintos elementos que componen el sistema, incluyendo el controlador lógico programable (PLC), los sensores de nivel del tanque de aditivo, las válvulas solenoides de accionamiento neumático y los elementos de salida asociados al proceso.



Dibujo:	Y. Elizondo	26/10/2025
Diseño:	Y. Elizondo	26/10/2025
Proyecto:	Trabajo final de graduación	Hoja
Parte:	Esquema de conexión a acometida eléctrica	1 de 3



Dibujo:	Y. Elizondo	26/10/2025
Diseño:	Y. Elizondo	26/10/2025
Proyecto:	Trabajo final de graduación	Hoja
Parte:	Esquema de conexión de salidas	2 de 3



Dibujo:	Y. Elizondo	26/10/2025
Diseño:	Y. Elizondo	26/10/2025
Proyecto:	Trabajo final de graduación	Hoja
Parte:	Ensamble de válvulas solenoides	3 de 3

# Apéndice C

## Repositorio digital de manuales, planos y resultados del sistema

A continuación, se proporciona un enlace a una carpeta de Drive que contiene los manuales de usuario y mantenimiento del sistema, las normas aplicadas, las hojas de datos de los componentes seleccionados, un video explicativo del funcionamiento del sistema, los planos mecánicos y eléctricos de la solución, y los resultados experimentales obtenidos antes y después de la implementación del sistema dosificador.

[https://drive.google.com/drive/folders/1HfproKWzuBFBPH-5Qh121HGgem\\_urLmU?usp=sharing](https://drive.google.com/drive/folders/1HfproKWzuBFBPH-5Qh121HGgem_urLmU?usp=sharing)