

Propuesta de automatización mediante PLC, HMI y sistema neumático virtual para el control de una estación de dosificación de productos en polvo granulado.

Carlos Daniel Silva Nieto

Maifer Stiven Herrera

Universitaria Agustiniiana - Uniagustiniana

Facultad de ingeniería

Programa de Ingeniería Mecatrónica

Bogotá D.C, Colombia

2026

Propuesta de automatización mediante PLC, HMI y sistema neumático virtual para el control de una estación de dosificación de productos en polvo granulado.

Carlos Daniel Silva Nieto

Maifer Stiven Herrera

Tutor

Wilson Javier Serrano Puerto

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecatrónico

Universitaria Agustiniiana - Uniagustiniana

Facultad de ingeniería

Programa de Ingeniería Mecatrónica

Bogotá D.C, Colombia

2026

Resumen

La automatización de procesos industriales mejora la eficiencia, la repetibilidad y la supervisión de los sistemas productivos mediante la integración de tecnologías de control. En la dosificación de polvos granulados, la adecuada coordinación entre sensores, actuadores y sistemas de control es fundamental para ejecutar el proceso de manera ordenada y reducir la intervención manual.

El presente proyecto propone la automatización y supervisión de una estación de dosificación mediante la programación de un controlador lógico programable (PLC) en el entorno CODESYS, el diseño de una interfaz HMI y la integración de un sistema neumático virtual en FluidSIM. La solución permite estructurar la secuencia de operación, definir los elementos de control y verificar el funcionamiento del sistema en un entorno de simulación.

El desarrollo se basa en un enfoque de ingeniería aplicada que incluye el análisis del proceso, la definición de la arquitectura funcional y la implementación de lógica de control secuencial. La interfaz HMI facilita la supervisión del proceso y la visualización de variables.

La validación se realiza mediante puesta en marcha virtual, comprobando la ejecución del ciclo automático y la interacción entre el PLC y el modelo neumático. Los resultados evidencian la viabilidad del sistema y la utilidad de la simulación para reducir riesgos y costos antes de una implementación física.

Palabras clave: Automatización industrial, PLC, HMI, dosificación de polvos granulados, neumática, simulación de procesos.

Abstract

Industrial process automation enhances the efficiency, repeatability, and monitoring of production systems through the integration of control technologies. In the dosing of granular powders, proper coordination among sensors, actuators, and control systems is essential for executing the process in an orderly manner and minimizing manual intervention.

This project proposes the automation and monitoring of a dosing station through the programming of a programmable logic controller (PLC) within the CODESYS environment, the design of an HMI interface, and the integration of a virtual pneumatic system in FluidSIM. The solution enables the structuring of the operating sequence, the definition of control elements, and the verification of system performance within a simulation environment.

The development is based on an applied engineering approach that includes process analysis, the definition of the functional architecture, and the implementation of sequential control logic. The HMI interface facilitates process monitoring and the visualization of variables.

Validation is carried out through virtual commissioning, verifying the execution of the automatic cycle and the interaction between the PLC and the pneumatic model. The results demonstrate the system's viability and the utility of simulation in reducing risks and costs prior to physical implementation.

Keywords: Industrial automation, PLC, HMI, granular powder dosing, pneumatics, process simulation.

Tabla de contenido

Capítulo I	12
Introducción	12
Formulación del problema	13
Pregunta de ingeniería	14
Objetivo general.	14
Objetivos específicos.	14
Capítulo II	15
Marco de referencia.....	15
Marco Teórico.....	15
Marco Conceptual.....	21
Marco Legal.....	22
Capítulo III	25
Desarrollo del Proyecto.....	25
Proyección para el desarrollo del proyecto	25
Objetivo específico 1	26
Análisis del proceso actual	26
Análisis del proceso mejorado	27
Comparación del proceso actual vs mejorado	28
Variables del sistema.....	28
Requerimientos técnicos de sensores y actuadores	29
Objetivo específico 2	31
Delimitaciones de diseño	31
Generación, evaluación y selección de alternativas de diseño	32
Arquitectura funcional del sistema	34
Secuencia de operación	42
Modos de funcionamiento	42
Interacción PLC – simulación.....	43
Selección de componentes del sistema	43
Objetivo específico 3	44
Implementación de la lógica de control en CODESYS.....	44
Diseño de la interfaz HMI.....	45
Integración con el modelo neumático en FluidSIM	46

Verificación del funcionamiento del sistema	47
Condiciones de seguridad del sistema	47
Capítulo IV	49
Análisis económico	49
Comparación de costos del proceso actual y automatizado	49
Inversión inicial del sistema	50
Periodo de recuperación de la inversión	50
Retorno de la inversión — ROI	50
Relación beneficio-costos	50
Valor Presente Neto — VPN	51
Conclusión del análisis económico	51
Capítulo V	52
Conclusiones.....	52
Recomendaciones.....	53
Referencia	55
Anexos.....	59

Lista de Tablas

Tabla 1	
<i>Variables del sistema</i>	28
Tabla 2	
<i>Requerimientos de sensores</i>	29
Tabla 3	
<i>Requerimientos de actuadores</i>	29
Tabla 4	
<i>Requerimientos del sistema de control</i>	30
Tabla 5	
<i>Alternativas para la arquitectura general.....</i>	32
Tabla 6	
<i>Alternativas para el sistema de dosificación.....</i>	32
Tabla 7	
<i>Alternativas para el sistema de sellado.....</i>	33
Tabla 8	
<i>Alternativas para la HMI.....</i>	34
Tabla 9	
<i>Relación de pulsos por gramaje.....</i>	45
Tabla 10	
<i>Comparación de proceso actual vs auto.....</i>	63
Tabla 11	
<i>Requerimientos de accesorios neumáticos.....</i>	63
Tabla 12	
<i>Requerimiento de elementos eléctricos auxiliares.....</i>	64
Tabla 13	
<i>Requerimientos de elementos mecánicos auxiliares.....</i>	64
Tabla 14	
<i>Escala de calificación</i>	65
Tabla 15	
<i>Criterios de evaluación y ponderación</i>	65

Tabla 16	
<i>Matriz de decisión para la HMI.....</i>	65
Tabla 17	
<i>Matriz de selección para el sistema de dosificación.....</i>	66
Tabla 18	
<i>Matriz de selección para la arquitectura general.....</i>	66
Tabla 19	
<i>Parámetros para el tornillo sinfín</i>	67
Tabla 20	
<i>Parámetros de esfuerzos y seguridad para el tornillo sinfín.....</i>	67
Tabla 21	
<i>Selección de PLC</i>	71
Tabla 22	
<i>Sensor motor paso a paso</i>	71
Tabla 23	
<i>Sensor de presencia.....</i>	72
Tabla 24	
<i>Selección del sensor de nivel de tolva.....</i>	72
Tabla 25	
<i>Selección del sensor de Posición del cilindro.....</i>	72
Tabla 26	
<i>Selección del sensor de temperatura.....</i>	73
Tabla 27	
<i>Selección de cilindro neumático.....</i>	73
Tabla 28	
<i>Selección de electroválvula.....</i>	74
Tabla 29	
<i>Celda de carga</i>	74
Tabla 30	
<i>Selección de HMI</i>	74
Tabla 31	
<i>Matriz de verificación de funcionamiento.....</i>	77

Tabla 32	
<i>Costos Sistema de control e instrumentación.....</i>	79
Tabla 33	
<i>Costos Sistema mecánico de dosificación.....</i>	80
Tabla 34	
<i>Costos Sistema neumatico.....</i>	80
Tabla 35	
<i>Costos Sistema eléctrico y protección.....</i>	80
Tabla 36	
<i>Costos Sistema térmico de sellado.....</i>	81
Tabla 37	
<i>Costos Accesorios y montaje.....</i>	81
Tabla 38	
<i>Resumen de costos</i>	81

Glosario

Actuador: Dispositivo que transforma una señal de control en una acción física, como el movimiento de cilindros neumáticos.

Aire comprimido: Fluido utilizado para transmitir energía en sistemas neumáticos industriales.

Arquitectura del sistema: Organización de los componentes de un sistema automatizado y su interacción.

Automatización industrial: Uso de tecnologías de control para operar procesos con mínima intervención humana.

Control secuencial: Tipo de control en el que el proceso se ejecuta por etapas en un orden definido.

CODESYS: Entorno de programación de PLC basado en la norma IEC 61131-3.

Dosificación: Proceso de entrega controlada de material, en este caso mediante la relación entre pulsos del motor y cantidad dosificada.

FluidSIM: Software para simulación de sistemas neumáticos, hidráulicos y eléctricos.

Granulación: Proceso de transformación de polvo en partículas más grandes para mejorar su manejo.

HMI (Interfaz Hombre-Máquina): Sistema que permite al usuario supervisar y controlar el proceso automatizado.

PLC (Controlador Lógico Programable): Dispositivo utilizado para controlar procesos automáticos mediante programación.

Polvo granulado: Material particulado con mayor tamaño y mejor fluidez que los polvos finos.

Puesta en marcha virtual: Validación de un sistema mediante simulación antes de su implementación real.

Sensor: Dispositivo que detecta variables físicas y las convierte en señales para el sistema de control.

Sistema neumático: Conjunto de elementos que utilizan aire comprimido para generar movimiento.

Tolva: Recipiente utilizado para almacenar y alimentar materiales granulados.

Válvula neumática: Dispositivo que regula el flujo de aire dentro de un sistema neumático.

Motor paso a paso: Actuador que convierte pulsos eléctricos en movimientos angulares discretos, permitiendo controlar la dosificación mediante el número de pulsos aplicados.

Capítulo I

Introducción

La automatización industrial es esencial para la construcción de sistemas de producción modernos y para la optimización de procesos, la repetibilidad de las operaciones de producción y la mínima necesidad de intervención humana, lograda a través de la integración de sensores, actuadores, controladores programables y sistemas de supervisión. Para la dosificación de productos en polvo y granulados, los dispositivos de control deben asegurar tanto el correcto desempeño del proceso como la estabilidad operativa.

Estos se realizan de manera manual o semiautomática en muchos entornos industriales, lo que resulta en fluctuaciones en la dosificación, dependencia del operador y restricciones en la supervisión del sistema. Los controladores lógicos programables (PLC) y los sistemas de supervisión HMI estructuran la secuencia operativa, coordinan los actuadores a utilizar y facilitan la interacción entre un operador y una máquina. Como resultado, la simulación y la puesta en marcha virtual han surgido como herramientas importantes en la ingeniería, ya que permiten confirmar que los sistemas automatizados funcionan antes de su realización física. Por lo tanto, permite la verificación de la lógica de control, la evaluación del comportamiento del sistema y la reducción de costos y riesgos de desarrollo.

Así, dentro de este contexto, este proyecto propone el diseño de una solución de automatización para estaciones de dosificación de polvo granulado mediante la programación de un PLC en el entorno CODESYS, el diseño de una interfaz HMI y la integración de una unidad neumática virtual en FluidSIM. Esto describe un modelo teórico del sistema de dosificación (un modelo para todo el proceso), diseñado en base a la conexión de pulsos producidos por el controlador para dosificar cantidades que permite realizar la simulación del comportamiento del proceso basado en las herramientas. Por último, esta documentación describe el análisis del proceso, el diseño de la arquitectura del sistema, el desarrollo de la

lógica de control, la integración al modelo neumático y valida el sistema mediante simulación, lo que demuestra que la solución es viable.

Formulación del problema

En el trabajo realizado en Proquivet SAS se pudo observar que el sistema de dosificación para productos granulados es el punto clave del procesamiento, ya que determina el valor del peso, la uniformidad de los productos y la conformidad con la calidad. En la producción de emulsiones veterinarias en polvo granulado, para ser más específicos, se necesita un método de dosificación confiable para garantizar que la cantidad correcta de producto entre en cada envase. Actualmente, esto crea limitaciones en la precisión del sistema de envasado con respecto al proceso de dosificación, ya que el peso debe variar varias veces para poder igualar la masa de la sustancia a los valores establecidos.

Esto crea variabilidad en las presentaciones de 25 g, 50 g y 100 g, así como un aumento en el tiempo de operación y la dependencia del operador. De manera similar, la intervención manual y el movimiento del producto entre las etapas de dosificación y sellado resultan en pérdidas de materia prima, una reducción en la eficiencia del proceso de producción. Económicamente, la reducción de desperdicios y la optimización de la mano de obra son suficientes para justificar una inversión en un sistema automatizado, ya que representa un buen retorno económico de la inversión. Por lo tanto, se requiere mejorar el sistema de dosificación mediante un proceso automatizado que minimice la intervención manual junto con una alta precisión y minimización de las pérdidas de producto. Por esta razón, el objetivo es desarrollar una máquina dosificadora automatizada que pueda modelar experimentalmente el comportamiento del proceso y ser seguida en una posible aplicación industrial.

Pregunta de ingeniería

¿Cómo mejorar la precisión y eficiencia del proceso de dosificación del polvo granulado de emulsiones veterinarias en la empresa Proquivet SAS mediante el diseño y simulación de una máquina dosificadora automatizada?

Objetivo general.

Diseñar la solución de automatización y supervisión de una estación de dosificación de productos en polvo mediante la programación de un controlador lógico programable (PLC) en CODESYS, el desarrollo de una interfaz HMI y la integración de un sistema neumático virtual en FluidSIM, con el fin de establecer y verificar la secuencia de operación, el monitoreo de variables y el registro de datos del proceso dentro de un entorno de puesta en marcha virtual.

Objetivos específicos.

- Analizar el proceso de dosificación de productos en polvo para identificar las etapas de operación, las variables del sistema y los dispositivos requeridos, definiendo los sensores, actuadores neumáticos y señales de entrada y salida del sistema automatizado.
- Diseñar la arquitectura funcional del sistema de automatización estableciendo la secuencia de operación, los modos de funcionamiento y la interacción entre el PLC, el sistema neumático virtual y los dispositivos de control.
- Implementar la lógica de control y la interfaz de supervisión del sistema mediante la programación del PLC en CODESYS, el diseño de pantallas HMI y la integración con el modelo neumático virtual en FluidSIM para verificar el funcionamiento del proceso automatizado.

Capítulo II

Marco de referencia

Marco Teórico

Para este proyecto es indispensable la aplicación de algunos segmentos aplicados y documentados en la constante evolución de la ingeniería. A continuación, se describen los procesos guía y normas técnicas en los que se apoya el desarrollo de esta propuesta.

Inicialmente puede utilizarse el control secuencial en sistemas de control industrial de manera muy amplia como una forma de proporcionar un flujo sistemático en un orden estructurado. Este tipo de control también puede coordinar actuadores y eventos en condiciones de transición que hacen posible la ejecución automática de procesos industriales (Bolton, 2015).

Como referente teórico, la norma IEC 61131-3 especifica cómo los lenguajes (por ejemplo, Ladder y SFC) estructuran la lógica de control y, por lo tanto, guían la programación de estos sistemas (Comisión Electrotécnica Internacional, 2013).

El diseño de elementos mecánicos rotativos requiere evaluar las cargas y esfuerzos a los que estarán sometidos durante su operación, con el propósito de garantizar estabilidad estructural y funcionamiento seguro. De acuerdo con Budynas y Nisbett (2020), los ejes y mecanismos helicoidales utilizados en sistemas de transmisión y transporte de material deben analizarse principalmente bajo criterios de torsión, esfuerzo cortante y factor de seguridad, ya que estos parámetros permiten estimar la capacidad mecánica del sistema frente a las cargas transmitidas por el motor y el material transportado.

En sistemas de transporte mediante tornillo sinfín, el movimiento rotacional generado por el motor produce un torque sobre el eje central y sobre la hélice transportadora. Este torque genera esfuerzos cortantes internos que deben permanecer dentro de los límites admisibles del material para evitar deformaciones permanentes o fallas mecánicas.

Asimismo, el análisis del ángulo de torsión permite verificar que las deformaciones del eje no afecten la estabilidad del proceso de dosificación ni la precisión del sistema automatizado.

Otro aspecto importante en el diseño mecánico es el uso del factor de seguridad, el cual se emplea para compensar incertidumbres relacionadas con variaciones de carga, propiedades del material, desgaste y condiciones reales de operación. Según Budynas & Nisbett, la aplicación de factores de seguridad en sistemas mecánicos permite aumentar la confiabilidad del diseño y reducir la probabilidad de falla durante el funcionamiento del equipo (Budynas & Nisbett, 2020).

En el presente proyecto, estos criterios se aplican al diseño preliminar del tornillo sinfín encargado de la dosificación del producto en polvo. Aunque el sistema se desarrolla únicamente en un entorno virtual y de simulación, los cálculos básicos de torque, esfuerzo cortante y factor de seguridad se utilizan como soporte técnico para justificar la selección geométrica del tornillo y validar conceptualmente la relación entre el movimiento del motor y la cantidad de material dosificado. De esta manera, el diseño mecánico se integra con el sistema de control automatizado, permitiendo establecer una relación funcional entre los pulsos del motor, el desplazamiento angular del tornillo y la masa suministrada en cada ciclo de operación.

Los cálculos estructurales y de fuerza que se aplican al tornillo sinfín según Budynas & Nisbett son los siguientes:

- Torque transmitido por el motor

Permite determinar el esfuerzo mecánico aplicado al tornillo.

$$T = \frac{9550P}{n}$$

Donde:

T = torque ($N \cdot m$)

P = potencia del motor (kW)

n = velocidad de rotación (*rpm*)

- Esfuerzo cortante por torsión del eje

Es el cálculo es relevante para determinar resistencia mecánica.

$$\tau = \frac{16T}{\pi d^3}$$

Donde:

τ = esfuerzo cortante (*Pa*)
 T = torque aplicado (*N · m*)
 d = diámetro del eje (*m*)

- Momento polar de inercia del eje

Útil en cálculos de torsión.

$$J = \frac{\pi d^4}{32}$$

Donde:

J = momento polar de inercia
 d = diámetro del eje

- Ángulo de torsión del eje

Permite verificar deformaciones torsionales.

$$\theta = \frac{TL}{JG}$$

Donde:

θ = ángulo de torsión
 T = torque
 L = longitud del eje
 J = momento polar
 G = módulo de rigidez del material

- Fuerza tangencial transmitida

Relaciona el torque con la fuerza aplicada sobre la hélice.

$$F_t = \frac{2T}{d}$$

Donde:

F_t = fuerza tangencial

T = torque

d = diámetro del eje o tornillo

- Potencia mecánica transmitida

Permite relacionar velocidad y torque.

$$P = T\omega$$

o también:

$$P = \frac{2\pi nT}{60}$$

Donde:

P = potencia

T = torque

ω = velocidad angular

n = rpm

- Factor de seguridad

Verifica confiabilidad mecánica.

$$FS = \frac{\tau_{adm}}{\tau}$$

Donde:

FS = factor de seguridad

τ_{adm} = esfuerzo admisible del material

τ = esfuerzo calculado

Para esta propuesta, estos fundamentos se aplican de manera conceptual para justificar el diseño preliminar del tornillo sinfín dosificador, considerando que la propuesta corresponde a un entorno virtual y de simulación, sin fabricación física del prototipo. Por ello, los cálculos mecánicos se emplean como soporte técnico para validar la relación entre geometría, torque y capacidad de dosificación del sistema automatizado.

De otra parte, un estudio reciente sobre la alimentación de polvos farmacéuticos afirmó que, para la adición continua de materiales particulados, debe ejercerse un control estable sobre el flujo del producto, especialmente en lo que respecta a polvos de baja fluidez o comportamiento cohesivo (Hou et al., 2024).

La dosificación mediante tornillo sinfín se basa en el transporte volumétrico de material a granel. En este sistema, el producto ingresa desde la tolva hacia el espacio disponible entre las hélices y es desplazado axialmente a medida que el tornillo gira. La capacidad de transporte depende principalmente de la geometría del tornillo, la velocidad de rotación, el paso de la hélice, el porcentaje de llenado y las características del material, como su densidad aparente y fluidez (KWS Manufacturing Company, s. f.; Tran et al., 2023).

Para estimar el volumen teórico desplazado por una vuelta, se considera el área anular disponible entre el diámetro exterior del tornillo y el diámetro del eje, multiplicada por el paso de la hélice y por un factor de llenado. Este último se incluye porque, en condiciones reales, el canal del tornillo no siempre se llena completamente debido a la alimentación desde la tolva, la fricción y el comportamiento del material (KWS Manufacturing Company, s. f.).

$$V = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) P \eta$$

Donde V es el volumen transportado por vuelta, D el diámetro exterior del tornillo, d el diámetro del eje central, P el paso de la hélice y η el factor de llenado. Posteriormente, la masa dosificada se obtiene multiplicando el volumen por la densidad aparente del producto:

$$m = V\rho$$

Donde m es la masa dosificada por vuelta y ρ la densidad aparente del producto. Esta aproximación permite relacionar los pulsos del motor paso a paso con la masa estimada de producto dosificado. Sin embargo, se reconoce que el resultado real puede variar por fluidez, compactación, humedad y uniformidad de alimentación, por lo que el cálculo se emplea como base teórica para la simulación y no reemplaza una calibración experimental.

Además, este modelo permite representar el comportamiento del sistema de dosificación sin ninguna simulación directa del transportador de tornillo, apoyando así su implementación en entornos de simulación. Teóricamente, la solución actual aplica esto con un motor paso a paso que puede ser utilizado como método de control al determinar la cantidad de material a mover según el número de pulsos y la masa dosificada, complementando con los sistemas neumáticos que están involucrados en la automatización de los procesos mecánicos que se llevan a cabo con aire comprimido para lograr las acciones de sellado. Estos sistemas permiten que los cilindros de doble efecto funcionen a través de válvulas direccionales que son controladas por señales eléctricas del PLC (Parr, 2011).

La neumática se emplea para el proceso de sellado y corte en el proyecto actual, que es altamente repetitivo y necesita un movimiento lineal rápido gobernado y regulado por válvulas solenoides bajo la supervisión del PLC. Esto involucra la validación del sistema, que se realiza mediante la simulación de la integración del sistema de control en un modelo de proceso a través de la puesta en marcha virtual. Este enfoque proporciona la oportunidad de

probar el comportamiento del sistema, analizar la lógica de control y reducir riesgos antes de la instalación real (Banks et al., 2010).

La puesta en marcha virtual se utiliza para probar algoritmos de control mediante modelos de simulación antes de la implementación práctica y es útil para probar sistemas automatizados en las etapas iniciales de diseño (Striffler & Voigt, 2023).

El marco teórico proporcionado actúa como punto de partida para la construcción del sistema automatizado propuesto y se compone de una combinación de control industrial, dosificación de materiales, neumática y supervisión. Estos principios permiten una solución coherente y aplicable al proceso de dosificación de productos en polvo.

Marco Conceptual

La automatización industrial: se refiere al uso de sistemas de control, sensores, actuadores y tecnologías de programación para operar procesos de producción con mínima intervención humana, permitiendo una mejora en la eficiencia, repetibilidad de las operaciones y control de las variables del proceso (Groover, 2020).

Dosificación de materiales granulares: La dosificación implica el suministro controlado de una cantidad específica de material en cada ciclo de operación. En los procesos de envasado industrial, la dosificación de polvos o gránulos debe asegurar la uniformidad en el peso del producto final y la estabilidad en el flujo del material (Perry & Green, 2019).

Controlador Lógico Programable (PLC): El PLC es un dispositivo electrónico industrial utilizado para controlar procesos automatizados mediante la lectura de señales de entrada, el procesamiento de un programa de control y la activación de señales de salida hacia los actuadores del sistema (Petruszella, 2017).

Interfaz Hombre-Máquina (HMI): La HMI es el sistema que permite la interacción entre el operador y el proceso automatizado. A través de esta interfaz, se pueden visualizar

las variables del sistema, monitorear el estado de los dispositivos y ejecutar comandos de control (Boyes, 2010).

Sistema neumático: Un sistema neumático utiliza aire comprimido como medio para la transmisión de energía para generar movimiento mecánico a través de actuadores como cilindros y válvulas direccionales, siendo ampliamente utilizado en maquinaria automatizada (Parr, 2011).

Puesta en marcha virtual: La puesta en marcha virtual es una metodología que permite la validación del funcionamiento de un sistema automatizado mediante la simulación del proceso y la interacción con el controlador programable antes de su implementación física (Wang & Lee, 2021).

Marco Legal

El proyecto ha sido producido dentro del marco de normas y directrices para la automatización industrial y la industria farmacéutica, que dirigen el diseño del sistema de control, la calidad del proceso y las condiciones de operación.

Para el dominio del control industrial, la norma IEC 61131-3 aplica al proyecto en la estructuración de la lógica de control programable implementada en CODESYS. En particular, se toma como referencia la definición de lenguajes normalizados para PLC, como Structured Text (ST), Ladder Diagram (LD), Function Block Diagram (FBD) y Sequential Function Chart (SFC), los cuales permiten organizar la programación del sistema de dosificación y sellado en variables, bloques funcionales, temporizadores, condiciones de habilitación y secuencias de operación. En este proyecto, su aplicación se evidencia en la lógica de control del motor dosificador por pulsos, la validación de sensores, la activación del sistema de sellado, la gestión de alarmas y la comunicación con la HMI. De esta manera, aunque el sistema se desarrolla en un entorno simulado, la programación queda estructurada bajo criterios compatibles con controladores industriales reales, facilitando su comprensión,

mantenimiento y posible migración futura a un PLC físico (Comisión Electrotécnica Internacional [IEC], 2013).

En cuanto al diseño de la interfaz de supervisión, se toma como referencia la familia de normas ISO 9241, específicamente las partes relacionadas con la ergonomía de la interacción humano-sistema. Para este proyecto, la ISO 9241-110 aplica en los principios de interacción entre el operador y la HMI, tales como la claridad de los comandos, la facilidad de uso, la prevención de errores y la capacidad del usuario para controlar el proceso. La ISO 9241-112 se relaciona con la presentación de la información en pantalla, por lo que orienta la visualización de variables como peso dosificado, temperatura de sellado, estado del ciclo, alarmas y conteo de producción. Finalmente, la ISO 9241-210 aporta el enfoque de diseño centrado en el usuario, permitiendo que la interfaz sea desarrollada considerando las necesidades del operador, la lectura rápida de información crítica y la reducción de errores durante la operación simulada del sistema (Organización Internacional de Normalización [ISO], 2010).

También se toma como referencia la norma ANSI/ISA-101.01-2015, orientada al diseño de interfaces hombre-máquina en sistemas de automatización de procesos. En este proyecto, su aplicación se relaciona con la estructuración de la HMI desarrollada para supervisar y operar la máquina dosificadora y selladora simulada. La norma aporta criterios para definir una filosofía de interfaz, organizar las pantallas de operación, establecer una navegación clara, presentar estados del sistema y visualizar alarmas de manera prioritaria. En la HMI del proyecto, estos criterios se evidencian en la visualización del estado del ciclo, la selección del gramaje, el conteo de pulsos, la presencia del sobre, el nivel de tolva, la temperatura de sellado y los mensajes de alarma. De esta manera, la interfaz no solo cumple una función visual, sino que facilita la operación segura, ordenada y comprensible del sistema automatizado (Sociedad Internacional de Automatización [ISA], 2015).

Con respecto al sector farmacéutico, se consideran las Buenas Prácticas de Manufactura (GMP), que proporcionan normas de gestión para la calidad, uniformidad y control de la producción. En este estudio, estos principios informan la construcción del sistema de dosificación, proporcionando una justificación para una mayor precisión del proceso, menos variación en el peso de las presentaciones y menos trabajo manual del producto, aspectos críticos para cumplir con los requisitos de calidad (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2014).

De igual manera, se tienen en cuenta los protocolos de seguridad y salud en el trabajo establecidos por la norma ISO 45001, que dirigen el diseño de sistemas automatizados seguros. En el marco del proyecto, estos principios permiten minimizar la intervención manual en el proceso de dosificación y sellado para limitar la exposición del operador al manejo del producto o a problemas de exposición a maquinaria peligrosa (Organización Internacional de Normalización [ISO], 2018).

Por último, la simulación y la puesta en marcha virtual son consistentes con los principios de ingeniería vigentes utilizados para validar sistemas automáticos antes de su implementación. Su aplicación en el proyecto permite monitorear cómo funcionará un sistema de control antes de su realización, reduciendo el riesgo operativo, el tiempo de puesta en marcha, los costos de pruebas en planta y los costos de mantenimiento (Banks et al., 2010).

En este sentido, las normas aplicadas constituyen un referente teórico y una guía que influye directamente en el diseño, validación y seguridad del nuevo aparato automatizado.

Capítulo III

Desarrollo del Proyecto

Proyección para el desarrollo del proyecto

Con el fin de representar de manera organizada el avance del proyecto, se elaboró un cronograma tipo Gantt que relaciona los objetivos específicos con las actividades desarrolladas, su periodo de ejecución y el porcentaje de cumplimiento alcanzado. Esta herramienta permite visualizar la secuencia de trabajo seguida durante el desarrollo de la propuesta, desde el análisis del proceso actual hasta la documentación final del sistema automatizado.

El cronograma se estructuró en un periodo de doce semanas, distribuyendo las actividades de acuerdo con las fases principales del proyecto: análisis del proceso, definición de variables y dispositivos, diseño funcional del sistema de automatización, implementación de la lógica de control en CODESYS, diseño de la interfaz HMI, integración con el modelo neumático virtual y verificación del ciclo automático en simulación. Esta organización permite evidenciar que el desarrollo se realizó de forma progresiva, manteniendo relación directa con los objetivos planteados en el trabajo de grado y con el alcance definido para la propuesta de automatización virtual. En el anteproyecto también se plantea el uso de un cronograma de ejecución de 12 semanas para organizar las fases del proyecto, por lo que este diagrama funciona como soporte visual del cumplimiento de dicha planificación.

El diagrama con los detalles específicos, junto con el avance de cada actividad y su duración están dispuestos en el **anexo A**.

Objetivo específico 1

Analizar el proceso de dosificación de productos en polvo para identificar las etapas de operación, las variables del sistema y los dispositivos requeridos, definiendo los sensores, actuadores neumáticos y señales de entrada y salida del sistema automatizado.

Análisis del proceso actual

El método actual de dosificación de los productos en polvo granulados de la empresa requiere una enorme cantidad de esfuerzo manual, lo que afecta la precisión, repetibilidad y eficiencia del sistema.

El proceso se inicia despachando manualmente la tolva desde bolsas de 25 kg gestionadas por el operador. La dosificación se realiza mediante un pedal que rota el transportador de tornillo.

La cantidad de material dosificado depende directamente de cuánto tiempo el operador mantiene presionado el pedal, por lo que el proceso es un sistema controlado por tiempo altamente dependiente del operador.

Después de llenar la bolsa, se retira y se lleva a una báscula externa, donde se verifica el peso. Debido a la baja precisión del sistema, todas las bolsas requieren corrección manual, ya sea quitando o agregando producto.

Las bolsas resultantes se transfieren en bandejas y se llevan manualmente a una estación de sellado tipo túnel separada. Según este proceso, existen pérdidas de material en las etapas de dosificación, manipulación y transporte, junto con una variabilidad significativa del peso final del producto.

El proceso de dosificación actual se muestra en el diagrama del **Anexo B**, que evidencia las fases manuales y los puntos críticos del proceso.

Análisis del proceso mejorado

El método propuesto incluye la automatización de la estación de dosificación, el control del sistema mediante un PLC y evitar la supervisión humana en etapas cruciales del proceso.

El sistema de dosificación es un sistema tipo transportador de tornillo, accionado por un motor paso a paso, controlado por pulsos que el PLC alimenta directamente desde sus respectivos pulsos. Este sistema tiene una relación directa entre el control digital y la masa dispensada y el número de pulsos enviados al motor, a partir de los cuales se determina la cantidad de material dosificado.

Así, para el control de dosificación se elige el control basado en pulsos debido a su conveniencia de trabajo y la vinculación directa que sigue entre el movimiento del motor y la cantidad de producto entregado. En contraste, el enfoque de pulsos minimiza la variación del proceso y ofrece un mejor control sobre la dosificación.

Durante el desarrollo del sistema, se tuvo en cuenta el control basado en tiempo, pero se abandonó debido a su sensibilidad a las condiciones variables del material, como la compactación y las variaciones de alimentación del transportador de tornillo.

El sistema utiliza una celda de carga, que es una forma de medir el peso de cada paquete, y con el control de retroalimentación, el número de pulsos puede cambiarse automáticamente en función del error del ciclo anterior.

Comienza con la detección del paquete mediante un sensor de presencia y luego la dosificación automática del producto. El paquete se sella y recorta mediante un sistema neumático en la misma plataforma, minimizando así el proceso de entrega y las pérdidas de material.

El proceso propuesto se describe en el diagrama presentado en el **Anexo C**, el cual muestra la integración del sistema automatizado y la secuencia de operación.

Comparación del proceso actual vs mejorado

La comparación entre los procesos actual y el automatizado se presenta en el **Anexo D**, donde se analizan las principales diferencias en términos de control, precisión y operación.

Variables del sistema

A partir del análisis del proceso, se identifican las variables necesarias para el control del sistema automatizado.

Tabla 1.

Variables del sistema

Variable	Descripción	Tipo
Sensor de presencia de sobre	Detecta la ubicación del sobre en la estación de llenado	Entrada
Final de carrera extendido	Detecta el cilindro en posición de sellado	Entrada
Final de carrera retraído	Detecta el cilindro en posición inicial	Entrada
Botón de inicio	Activa el ciclo automático	Entrada
Botón de paro	Detiene el sistema	Entrada
Paro de emergencia	Interrumpe completamente la operación	Entrada
Sensor de nivel de tolva	Indica si hay suficiente producto disponible	Entrada
Selector de Aut o Man	Selector de automático o manual	Entrada
Celda de carga	Mide el peso del producto dosificado	Entrada Análoga
Sensor de temperatura	Verifica temperatura de sellado	Entrada Análoga
Señal de pulsos motor	Controla el giro del tornillo sinfín	Salida
Electroválvula neumática	Activa el cilindro de sellado y corte	Salida
Luces indicadoras	Muestran estado del sistema	Salida
Alarma sonora	Indica fallas o condiciones críticas	Salida
Número de pulsos	Define la cantidad a dosificar	Interna
Masa dosificada	Valor calculado del producto	Interna
Error de dosificación	Diferencia entre valor real y deseado	Interna
Contador de sobres	Registra la producción	Interna
Presentación seleccionada	Define el gramaje (25 g, 50 g, 100 g)	Interna

Fuente: autoría propia (2026)

Requerimientos técnicos de sensores y actuadores

Con base en el análisis del proceso, se establecen las características mínimas que deben cumplir los dispositivos del sistema.

Tabla 2.

Requerimientos de sensores

Sensor	Tipo	Requerimiento técnico
Presencia de sobre	Fotoeléctrico	Alcance 5–20 cm; respuesta ≤ 10 ms; salida digital 24 VDC
Nivel de tolva	Capacitivo	Detección de sólidos; ajuste de sensibilidad; salida digital
Celda de carga	Plataforma	Rango 0–200 g; precisión $\leq \pm 0.5$ g; salida analógica
Posición cilindro	Final de carrera	Repetibilidad ≤ 1 mm; protección industrial
Temperatura	Termopar / RTD	Rango hasta 200 °C; precisión $\leq \pm 2$ °C

Fuente: autoría propia (2026)

Tabla 3.

Requerimientos de actuadores

Actuador	Tipo	Requerimiento técnico
Motor dosificación	Paso a paso o servomotor	Resolución angular $\leq 1.8^\circ$ por paso, para garantizar control fino en la dosificación por pulsos
Cilindro neumático	Doble efecto	Para un cilindro de 32 mm operando a 4 – 6 bar, la fuerza generada se encuentra en el orden de 300–500 N, valor suficiente para garantizar el proceso de sellado y corte del sobre.
Electroválvula	5/2 monoestable	24 VDC; retorno por resorte; caudal nominal ≥ 20 Nl/min para accionar un cilindro de Ø32 mm y carrera 50 mm
Sistema de sellado	Térmico	Temperatura y presión controladas

Fuente: autoría propia (2026)

Un motor paso a paso puede ser seleccionado porque puede ser posicionado con precisión, sin la necesidad de retroalimentación adicional. Esta característica permite la posibilidad de crear un sistema de dosificación basado en pulsos, donde cada paso del motor está asociado con una cantidad predeterminada de material transportado. Además, este tipo de

motor ofrece la posibilidad de un entorno basado en simulación y control (en formato PLC) cuando las señales digitales se introducen directamente en el sistema de control.

Tabla 4.

Requerimientos del sistema de control

Componente	Requerimiento técnico
PLC	- Generación de pulsos ≥ 5 kHz para control del motor paso a paso
	- ≥ 12 entradas digitales
	- ≥ 8 salidas digitales
	- ≥ 2 entradas analógicas
	- Tiempo de ciclo ≤ 10 ms
	- Alimentación 24 VDC
	- Compatibilidad con HMI
	- Soporte de comunicación Modbus TCP para integración con HMI
	- Puerto Ethernet integrado
	- Compatibilidad con entorno de programación (CODESYS o equivalente)
HMI	- Visualización de peso, estado y alarmas
	- Selección de presentación (25, 50, 100 g)

Fuente: autoría propia (2026)

Los requerimientos de los elementos auxiliares del sistema se presentan en el **Anexo E**, donde se especifican los componentes neumáticos, eléctricos y mecánicos necesarios para la implementación del sistema automatizado.

Objetivo específico 2

Diseñar la arquitectura funcional del sistema de automatización estableciendo la secuencia de operación, los modos de funcionamiento y la interacción entre el PLC, el sistema neumático virtual y los dispositivos de control.

Delimitaciones de diseño

El proyecto en curso contempla el diseño de una solución de automatización y supervisión para una estación de dosificación de productos en polvo, desarrollada dentro de un entorno virtual de simulación. En este sentido, el alcance del diseño se orienta principalmente a la arquitectura funcional del sistema, la definición de sensores y actuadores, la programación del controlador lógico programable, el desarrollo de la interfaz HMI, la integración del sistema neumático virtual y la validación de la secuencia de operación mediante simulación.

Por lo anterior, el diseño desarrollado no corresponde a un diseño mecánico industrial definitivo ni a un diseño estructural certificado para fabricación, montaje o puesta en operación en planta. La validación mecánica del tornillo sinfín se aborda de manera conceptual y simplificada, con el propósito de verificar que las condiciones básicas de operación sean coherentes con la función de dosificación planteada.

Debido a que el proyecto no contempla la construcción física del prototipo ni pruebas experimentales con material real, no se desarrollan análisis avanzados de manufactura, fatiga, desgaste, elementos finitos o certificación mecánica. Sin embargo, se incluyen cálculos básicos del tornillo sinfín y factor de seguridad como soporte técnico preliminar del sistema de dosificación propuesto.

De esta manera, el término diseño se entiende en el marco del proyecto como el desarrollo de una solución funcional, digital y automatizada, validada mediante simulación, y no como el diseño mecánico final de una máquina industrial lista para fabricación.

Generación, evaluación y selección de alternativas de diseño

Es necesario a continuación, documentar los conceptos de diseño considerados para la arquitectura general del sistema, el mecanismo de dosificación, el sistema de sellado, la estrategia de control y la interfaz HMI.

Tabla 5

Alternativas para la arquitectura general

Alternativa	Descripción	Ventajas	Desventajas
A1. Sistema manual asistido	El operador acciona manualmente la dosificación y el sellado	Bajo costo, simple implementación	Baja trazabilidad, mayor error humano, poca automatización
A2. Sistema semiautomático	El operador posiciona el sobre y el sistema dosifica automáticamente	Menor complejidad, control parcial del proceso	Aún depende mucho del operador
A3. Sistema automático simulado con PLC, HMI y sensores virtuales	El sistema valida condiciones, dosifica, sella y registra variables	Mayor trazabilidad, mejor control, compatible con simulación	Mayor complejidad de programación

Nota: Diseño seleccionado: A3. Fuente: autoría propia (2026)

Se seleccionó la arquitectura automática simulada con PLC, HMI y sensores virtuales porque permite cumplir el objetivo general del proyecto, el cual busca diseñar y simular una máquina dosificadora incorporando monitoreo digital, trazabilidad e interconectividad.

Tabla 6

Alternativas para el sistema de dosificación

Alternativa	Descripción	Ventajas	Desventajas
B1. Dosificación por tiempo	El motor se activa durante un tiempo fijo	Fácil de programar	Menor precisión si cambia la densidad o fluidez del polvo
B2. Dosificación por peso con celda de carga	Se dosifica hasta alcanzar el peso objetivo	Mayor precisión	Más compleja de simular e implementar

Alternativa	Descripción	Ventajas	Desventajas
B3. Dosificación por pulsos de motor	La cantidad dosificada depende del número de pulsos del motor	Buena repetibilidad, fácil ajuste por presentación, compatible con CODESYS	Requiere calibración inicial

Nota: Diseño seleccionado: B3. Fuente: autoría propia (2026)

Se seleccionó la dosificación por pulsos porque permite relacionar de forma directa el giro del motor con la cantidad de producto dosificado.

Tabla 7

Alternativas para el sistema de sellado

Alternativa	Descripción	Ventajas	Desventajas
C1. Sellado manual externo	El operador retira el sobre y lo sella en otro equipo	Simple	No integra el proceso, baja eficiencia
C2. Sellado térmico temporizado	El sistema activa una resistencia o mordaza durante un tiempo definido	Fácil de controlar, compatible con TON en Ladder	Requiere control de temperatura
C3. Sellado térmico con control avanzado de presión y temperatura	Controla temperatura, tiempo y presión de forma más precisa	Mayor calidad de sellado	Mayor complejidad y más variables

Nota: Diseño seleccionado: C2. Fuente: autoría propia (2026)

Se seleccionó el sellado térmico temporizado porque permite integrar el cierre del sobre dentro del ciclo automático sin aumentar excesivamente la complejidad del sistema. El uso de un temporizador TON permite definir un tiempo de sellado constante, mientras que la validación de temperatura mínima y máxima evita que el sellado se ejecute fuera del rango permitido.

Tabla 8*Alternativas para la HMI*

Alternativa	Descripción	Ventajas	Desventajas
D1. HMI de una sola pantalla	Todos los controles, estados y alarmas están en una pantalla	Acceso rápido a toda la información	Puede verse saturada y difícil de operar
D2. HMI dividida por pantallas	Pantalla principal, parámetros, producción y alarmas	Más ordenada, mejor lectura, menor carga visual	Requiere navegación entre pantallas
D3. HMI tipo tablero avanzado	Incluye gráficas, tendencias, indicadores históricos y múltiples paneles	Mayor análisis visual	Más difícil de implementar en CODESYS y puede ser excesiva para el alcance

Nota: Diseño seleccionado: D2. Fuente: autoría propia (2026)

Se seleccionó una HMI dividida por pantallas porque permite separar la operación principal, la configuración de parámetros, el seguimiento de producción y la visualización de alarmas.

Las tablas de ponderación que definen la selección de la arquitectura y sistemas necesarios para la puesta en marcha del proyecto están relacionados en el **Anexo F**

Arquitectura funcional del sistema

La estructura del sistema está diseñada para incorporar un PLC, una interfaz HMI, un sistema de dosificación por pulsos y un sistema neumático de sellado y corte, ya que estos componentes permiten estructurar el proceso de manera secuencial, supervisada y repetible.

El PLC se elige como el núcleo de control para habilitar la lógica secuencial del proceso, incluyendo la verificación de condiciones de seguridad, la gestión de alarmas y el control de las señales de entrada y salida del sistema. También permite el desarrollo de modos de operación automática y manual necesarios para pruebas, ajustes y mantenimiento.

El control de dosificación por pulsos se justifica ya que permite correlacionar directamente el número de pulsos enviados al motor con la cantidad de producto dosificado.

Permite ajustar presentaciones de 25 g, 50 g y 100 g y aplicar correcciones en el ciclo siguiente basadas en el error calculado.

Por lo tanto, la interfaz HMI se integró hacia los procesos para una mejor supervisión en el proceso donde el operador puede seleccionar la presentación, estimar el peso, validar el estado de sensores y actuadores, verificar alarmas y comprobar variables de producción. Esto permite la automatización del proceso y mejora la trazabilidad y el control operativo.

Este sistema neumático se utiliza para sellar y cortar la bolsa, ya que los actuadores neumáticos son adecuados para movimientos lineales rápidos y repetitivos con suficiente fuerza. Integrado con el PLC, puede guiar de manera segura el cilindro hacia adelante y hacia atrás a través de válvulas solenoides e interruptores de límite.

Por último, la simulación en CODESYS y FluidSIM nos permite validar la secuencia de operación antes de la realización física, reduce los riesgos técnicos y proporciona verificación de la interacción entre la lógica de control y el sistema neumático virtual.

Este es el subsistema de dosificación, que dispensa el producto utilizando un sinfín accionado por un motor paso a paso con pulsos liberados desde el PLC. El mismo subsistema también incluye el cálculo del peso dosificado y una corrección automática de errores en el siguiente ciclo. La constante de dosificación k se define como la correlación de la masa transportada por cada pulso del motor con las propiedades físicas del sistema de dosificación. Para el sinfín, este valor está relacionado con el volumen desplazado por revolución y la densidad aparente del material.

Para el desarrollo de la propuesta se selecciona un tornillo sinfín horizontal comercial de 25 mm de diámetro externo, 8 mm de diámetro de eje, 25 mm de paso y 250 mm de longitud aproximada, fabricado en acero inoxidable AISI 304. El tornillo sinfín se propone en acero inoxidable AISI 304 debido a que está en contacto directo con el producto dosificado. Este material ofrece buena resistencia a la corrosión, facilidad de limpieza, estabilidad

mecánica y disponibilidad comercial, características importantes para reducir riesgos de contaminación y mantener coherencia con una aplicación orientada a procesos farmacéuticos. Aunque el proyecto es de carácter virtual, esta selección permite que el diseño sea técnicamente viable para una posible implementación física futura.

Para el cálculo se asumió una densidad aparente del producto de 0,8 g/cm³ y un factor de llenado del 90 %, considerando que el tornillo permanece alimentado por la tolva durante la operación. Bajo estas condiciones, el volumen útil transportado por vuelta es de 9,91 cm³, equivalente a una masa aproximada de 7,93 g/vuelta.

Con base en un control de 200 pulsos por revolución, la relación de dosificación obtenida es de 0,0396 g/pulso. Por tanto, las cantidades de dosificación se ajustan a 631 pulsos para 25 g, 1261 pulsos para 50 g y 2522 pulsos para 100 g. Estos valores se emplean como pulsos base del sistema y pueden ser corregidos mediante retroalimentación de la celda de carga para mantener el error de dosificación dentro del margen establecido de ± 5 %.

A partir del modelo de dosificación volumétrica descrito en el marco teórico, se calcula la cantidad aproximada de producto desplazada por cada vuelta del tornillo sinfín. Partiendo de los parámetros del tornillo, hacemos el cálculo de la dosificación por vuelta de la siguiente forma:

$$V = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)P \cdot \eta$$

Con:

$$D = 2,5 \text{ cm}$$

$$d = 0,8 \text{ cm}$$

$$P = 2,5 \text{ cm}$$

$$\eta = 0,90$$

$$V = \frac{\pi}{4}(2,5^2 - 0,8^2)(2,5)(0,90)$$

$$V = \frac{9,91 \text{ cm}^3}{\text{vuelta}}$$

$$m = 9,91 \cdot 0,8 = \frac{7,93 \text{ g}}{\text{vuelta}}$$

Entonces

$$1 \text{ vuelta} = 7,93 \text{ g}$$

Si el motor trabaja con 200 pulsos por vuelta

$$\frac{7,93}{200} = 0,0396 \text{ g/pulso} \approx 0.04 \text{ g/pulso}$$

Este valor permite establecer una relación directa entre los pulsos generados por el PLC y la masa dosificada, garantizando un control proporcional del sistema.

Para el motor paso a paso con resolución de 1.8° por paso, se tiene un total de 200 pasos por revolución, lo que permite un control fino del sistema de dosificación, ya que pequeñas variaciones en el número de pulsos generan cambios proporcionales en la masa dosificada.

Esto garantiza que el sistema opera en un rango adecuado de control sin pérdida de precisión.

Durante la operación, el tornillo está sometido principalmente a esfuerzos de torsión y fuerzas tangenciales producidas por la resistencia del material en polvo al desplazamiento helicoidal. Por esta razón, el cálculo del esfuerzo cortante, el ángulo de torsión y el factor de seguridad permite verificar que el sistema mecánico puede mantener una dosificación estable y repetitiva sin comprometer la precisión del proceso

Para la verificación estructural preliminar se tomó como dato de entrada el torque nominal del motor, equivalente a:

$$T = 40 \text{ N} \cdot \text{cm} = 0,40 \text{ N} \cdot \text{m}$$

La velocidad de operación del tornillo se considera variable entre 60 y 200 rpm, controlada mediante la frecuencia de pulsos del sistema.

Fuerza tangencial (F_t) sobre el tornillo:

Donde:

$$T = 0,40 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$D = 0,025 \text{ m}$$

Sustituyendo:

$$F_t = \frac{2(0,40)}{0,025}$$

$$F_t = 32 \text{ N}$$

Por tanto, la fuerza tangencial aproximada aplicada sobre el diámetro exterior del tornillo es de:

$$F_t = 32 \text{ N}$$

Esfuerzo cortante por torsión en el eje del tornillo

Donde:

$$T = 0,40 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$d = 0,008 \text{ m}$$

Sustituyendo:

$$\tau = \frac{16(0,40)}{\pi(0,008)^3}$$

$$\tau = 3,98 \text{ MPa}$$

El esfuerzo cortante generado por el torque del motor sobre el eje de 8 mm es bajo para un elemento fabricado en acero inoxidable AISI 304.

Momento polar de inercia del eje:

$$J = \frac{\pi d^4}{32}$$

$$J = \frac{\pi(0,008)^4}{32}$$

$$J = 4,02 \times 10^{-10} m^4$$

Ángulo de torsión del eje:

$$\theta = \frac{TL}{JG}$$

Donde:

$$T = 0,40 N \cdot m$$

$$L = 0,25 m$$

$$J = 4,02 \times 10^{-10} m^4$$

$$G = 77 \times 10^9 Pa$$

Sustituyendo:

$$\theta = \frac{(0,40)(0,25)}{(4,02 \times 10^{-10})(77 \times 10^9)}$$

$$\theta = 0,00323 rad$$

$$\theta = 0,185^\circ$$

El ángulo de torsión calculado es pequeño, por lo que no se espera una deformación angular significativa que afecte la dosificación.

Verificación del adaptador de 5 mm a 8 mm:

Como el motor tiene eje de 5 mm y se emplea un adaptador para acoplarlo al eje de 8 mm del tornillo, también se verifica el punto más crítico:

$$\tau = \frac{16(0,40)}{\pi(0,005)^3}$$

$$\tau = 16,30 MPa$$

Aunque el esfuerzo es mayor que en el eje de 8 mm, sigue siendo bajo para una aplicación de baja potencia.

Factor de seguridad

Tomando como referencia el acero inoxidable AISI 304, con límite de fluencia aproximado de:

$$S_y = 215 \text{ MPa}$$

El esfuerzo cortante admisible por criterio de energía de distorsión se estima como:

$$\tau_{adm} = \frac{S_y}{\sqrt{3}}$$

$$\tau_{adm} = \frac{215}{1,732}$$

$$\tau_{adm} = 124,13 \text{ MPa}$$

Para el eje de 8 mm:

$$FS = \frac{\tau_{adm}}{\tau}$$

$$FS = \frac{124,13}{3,98}$$

$$FS = 31,2$$

Para el adaptador de 5 mm:

$$FS = \frac{124,13}{16,30}$$

$$FS = 7,6$$

Los resultados muestran que el tornillo sinfín seleccionado presenta una condición mecánica favorable para la aplicación propuesta. El esfuerzo cortante calculado en el eje de 8 mm es bajo frente a la resistencia del acero inoxidable AISI 304, y el ángulo de torsión obtenido no representa una deformación significativa para el proceso de dosificación. Aunque el adaptador de 5 mm constituye el punto más crítico del sistema de transmisión, su factor de seguridad calculado sigue siendo superior al valor mínimo adoptado para el diseño conceptual. Por tanto, el conjunto motor-adaptador-tornillo se considera adecuado para la

simulación del sistema dosificador. Las imágenes y tablas referentes al tornillo sinfín están disponibles en el **Anexo G**.

El subsistema de sellado y corte utiliza un cilindro neumático de doble efecto que realiza ambas operaciones en un solo movimiento, reduciendo la complejidad del sistema.

La fuerza del cilindro neumático se calcula a partir de la presión de trabajo y el área del émbolo:

$$F = P \cdot A$$

Donde:

$$P = 5bar = 5 \times 10^5 Pa$$

$$D = 32mm = 0.032m$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (0.032)^2}{4} = 8.04 \times 10^{-4} m^2$$

$$F = 5 \times 10^5 \times 8.04 \times 10^{-4} = 402N$$

Ahora, este valor está bien dentro del rango requerido para el proceso de sellado y corte, permitiendo que el actuador realice la función establecida.

Un subsistema de control, desarrollado dentro del PLC, coordina la secuencia de operación, valida las condiciones de funcionamiento y asegura que el modelo de dosificación se ejecute en base a la relación entre pulsos y masa. A través del HMI, el subsistema de supervisión permite la selección de presentaciones, la visualización de variables y la gestión de alarmas.

La interacción entre el sistema de control y el proceso se lleva a cabo mediante la integración de CODESYS y FluidSIM, donde el PLC ejecuta la lógica y FluidSIM representa el comportamiento del sistema neumático. La comunicación entre el PLC y la interfaz HMI se realiza utilizando el protocolo Modbus TCP, ampliamente adoptado en la industria por su simplicidad, fiabilidad y facilidad de implementación.

La interacción entre los elementos del sistema de control, sensores y actuadores se representa en el **Anexo H**, mediante un diagrama de conexiones que muestra la relación entre el PLC, el sistema neumático virtual y los dispositivos de campo.

Secuencia de operación

El sistema funciona de manera secuencial, comenzando en un modo de reposo con el cilindro retraído mientras espera las condiciones habilitantes. Cuando se activa el modo automático, el ciclo comienza reconociendo el sobre y lanzando el comando de inicio.

El PLC emite una serie de pulsos que son consistentes con la presentación seleccionada y procesa la dosificación del producto. Luego se establece un tiempo de estabilización y se estima la masa dosificada utilizando un modelo funcional.

El valor medido se compara con el valor objetivo, se calcula la desviación y se cambia el número de pulsos en el siguiente ciclo dentro de una tolerancia del 5%. Al final de esta etapa, el cilindro neumático se activa para sellar y cortar el sobre, permaneciendo en su posición extendida durante un tiempo predeterminado antes de regresar a su posición original.

El sistema actualiza las variables operativas al final de este ciclo y espera un nuevo sobre.

La secuencia de operación detallada se presenta en el **Anexo I**.

Durante el desarrollo del sistema se priorizó la modularidad de la lógica de control, permitiendo separar las etapas de dosificación, sellado y verificación, lo que facilita futuras modificaciones o ampliaciones del sistema.

Modos de funcionamiento

El sistema cuenta con dos modos de operación: automático y manual.

En modo automático, el sistema ejecuta el ciclo completo de dosificación, cálculo, corrección y sellado sin intervención del operario, siempre que se cumplan las condiciones de operación.

En modo manual, el operario puede accionar individualmente los actuadores del sistema, permitiendo realizar pruebas, ajustes y mantenimiento.

Interacción PLC – simulación

El sistema PLC que funciona en CODESYS es el corazón del sistema, donde se implementa la lógica de control y se generan las señales necesarias para ejecutar el proceso. FluidSIM representa el comportamiento del sistema neumático, permitiendo la simulación de la respuesta del cilindro y la válvula.

La dosificación se modela dentro del PLC basándose en una relación funcional de pulsos y masa y no en una representación física del transportador de tornillo. El sistema puede validarse en un entorno de simulación antes de implementarse en un entorno físico como resultado de esta integración.

Selección de componentes del sistema

Para la posible realización física del sistema automatizado, se consideró el PLC Siemens S7-1200 CPU 1212C DC/DC/DC, ya que tenía la capacidad de generación de pulsos para el control del motor de dosificación.

Se empleó el motor paso a paso NEMA 17 modelo 17HS4401, que es capaz de entregar la dosis precisa a través del control de pulsos. Según el tipo de PLC seleccionado y su aplicación normal en la industria, este criterio ha definido el requisito de que las salidas de los sensores del sistema sean de tipo PNP.

Esta configuración permite una inserción más segura y confiable en el sistema de control. El sistema neumático consta del cilindro Festo ADN-32-50-A y la válvula solenoide Festo VUVG-LK14-M52-AT-G18-1H2L, elegidos por su precisión y compatibilidad con

entornos de automatización. Se utilizó el sensor Omron E3Z-D61 para la detección de sobres y una celda de carga TAL220 de 200 g para la medición de peso.

La comparación técnica y criterios de selección de componentes se presentan en el **Anexo J**.

Objetivo específico 3

Implementar la lógica de control y la interfaz de supervisión del sistema mediante la programación del PLC en CODESYS, el diseño de pantallas HMI y la integración con el modelo neumático virtual en FluidSIM para verificar el funcionamiento del proceso automatizado.

Implementación de la lógica de control en CODESYS

La lógica de control del sistema automatizado fue diseñada en CODESYS utilizando tanto el Diagrama de Escalera (LD) para la lógica secuencial como Texto Estructurado (ST) para calcular las variables del proceso.

El código se organizó en módulos funcionales para controlar el control automático, el modo manual, el manejo de alarmas y el cálculo de dosificación que permiten la organización del sistema y la validación de esas operaciones. La secuencia de la operación se formuló como estados que representan cada etapa del proceso.

Estos estados incluyen: reposo, validación de condiciones, dosificación, estabilización, cálculo de peso, corrección de errores, sellado, retorno del cilindro y fin de ciclo. La dosificación se simuló utilizando la relación funcional del número de pulsos generados y la masa dispensada según la ecuación:

$$m = N * k$$

Donde $k = 0,0396 \text{ g/pulso}$

Para las presentaciones seleccionadas de 25 g, 50 g y 100 g, el número base de pulsos se calcula aplicando la ecuación anterior:

Tabla 9.*Relación de pulsos por gramaje.*

Presentación	Relación de cálculo	Pulsos base ajustados
25 g	25 / 0,0396	631 pulsos
50 g	50 / 0,0396	1261 pulsos
100 g	100 / 0,0396	2522 pulsos

Fuente: autoría propia (2026)

El sistema corregido se ajustó proporcionalmente al error calculado y la corrección se limitó a un máximo del 5% del valor base para garantizar la estabilidad operativa.

Se integraron temporizadores para los tiempos de estabilización, sellado y transición entre ciclos, establecidos en 2 segundos para cada etapa.

La solución proporciona gestión de alarmas al evitar que el modo automático funcione bajo condiciones como ausencia de un sobre, nivel bajo en la tolva, fallos en los cilindros, error de dosificación fuera de tolerancia o activación de parada de emergencia. Estas alarmas pueden ser vistas y reiniciadas desde la interfaz HMI.

La implementación de la lógica de control se presenta en el **Anexo K**.

Diseño de la interfaz HMI

La interfaz HMI fue diseñada para ser una interfaz simple para el usuario en el monitoreo y operación del sistema, que puede ser fácilmente accesible a través de pantallas interconectadas.

Se produjo una pantalla principal para proporcionar datos generales del sistema y las otras funciones. La pantalla también muestra la elección de presentación, masa objetivo, masa dosificada, contador de sobres, estado del proceso y la variable de error del último ciclo, así como los controles de inicio y parada. La pantalla de modo manual admite la acción autónoma tanto del motor de dosificación como del sistema neumático, y el registro del estado de los sensores como un punto visual para probar el sistema.

Se implementó una pantalla de alarmas para indicar lo que está sucediendo en tiempo real o aparece como ventanas emergentes en cualquier pantalla. También se especificó una pantalla de parámetros para la presentación del producto y la cantidad a procesar. Finalmente, se incluyó una pantalla de producción para mostrar variables acumuladas como el número total de sobres, masa procesada y el último error registrado. La pantalla se navegará a través de un menú lateral con indicaciones visuales tipo lámpara que indican el estado de los sensores y actuadores.

El diseño de las pantallas HMI se presenta en el **Anexo L**.

Integración con el modelo neumático en FluidSIM

La validación del sistema incluyó la fusión del entorno CODESYS con el software FluidSIM, permitiendo simulaciones del comportamiento del sistema neumático. En FluidSIM, simularon el cilindro neumático de doble efecto, la válvula solenoide 5/2, los interruptores de límite y los sensores de presencia para el nivel de sobre y tolva, estos últimos implementados utilizando botones pulsadores anclados.

El PLC envía señales de control a FluidSIM para activar el motor dosificador y la válvula solenoide, y el entorno de simulación proporciona las señales correspondientes a la posición del cilindro y los sensores del proceso.

El motor dosificador, en este caso un actuador simbólico, era diagramático, ya que el cálculo de la masa dosificada se realizaba dentro del PLC. La acción del cilindro se configuró para que avance y retroceda en función de las señales de control, con un retraso máximo de 5 segundos para cada posición (permitiendo identificar fallos).

La celda de carga no está implementada para controlar directamente la dosificación en línea, sino para permitir la verificación y retroalimentación, mientras que el número de pulsos se varía en ciclos posteriores según el error obtenido.

Las evidencias de simulación FluidSim realizadas se presentan en el **Anexo M**.

Verificación del funcionamiento del sistema

La validación del sistema se ejecutó mediante pruebas en el entorno de simulación, incluyendo la verificación de la correcta ejecución de la secuencia de operación, la comunicación entre el PLC y el modelo neumático, y el funcionamiento de la interfaz HMI.

Se analizaron la operación automática, el cambio de presentación, la corrección de errores, la activación de alarmas, la operación en modo manual y los estados de falla (como parada de emergencia, nivel bajo de tolva). Las pruebas obtenidas demostraron la consistencia del sistema automatizado, permitiendo que la lógica de control se implementara correctamente y que los subsistemas definidos se comunicaran.

El sistema contiene una condición de control de temperatura relacionada con el proceso de sellado. Si la temperatura está fuera del rango establecido, el ciclo automatizado se detiene y se activa un sistema de alarma para prevenir la generación de sellos defectuosos o el deterioro del producto.

Las evidencias de simulación y pruebas realizadas se presentan en el **Anexo N**.

Condiciones de seguridad del sistema

Las disposiciones de seguridad para la protección del operador, el equipo y el producto están incluidas en la lógica de control PLC del sistema automatizado. Se establecen condiciones de seguridad para el personal, por ejemplo, habilitando un paro de emergencia que desactiva instantáneamente todos los actuadores del sistema y validando estados seguros antes de que pueda comenzar cualquier ciclo automático.

Finalmente, en cuanto a la protección de la máquina, las condiciones incluyen verificar la posición del cilindro neumático a través de interruptores de límite para evitar cualquier movimiento que pueda resultar en daño mecánico. Además, se asignan tiempos máximos de operación para identificar cualquier falla en el movimiento del actuador.

Para la protección del producto, se consideran condiciones como la validación de la temperatura del sistema de sellado y el control de errores de dosificación para evitar la producción de paquetes fuera de especificación. Estas condiciones se evalúan continuamente dentro del programa de control, y el sistema se detiene automáticamente si no cumple con estas condiciones y activa las alarmas correspondientes.

Capítulo IV

Análisis económico

El análisis económico se realiza como una estimación preliminar, ya que el proyecto se desarrolla en un entorno de diseño y simulación. Es por eso que, los valores presentados no corresponden a una implementación real ya ejecutada, sino a una proyección basada en los costos de los componentes seleccionados, la reducción de mano de obra, la disminución del desperdicio y el aumento esperado de la producción.

Actualmente se cuenta con una jornada de 8 horas durante 26 días al mes. Este proceso requiere 3 operarios, con un costo mensual de \$3.011.084 COP por cada trabajador, lo que representa \$9.033.252 COP al mes. Además, la producción actual es de aproximadamente 52.000 sobres mensuales y su desperdicio es del 10 %, lo que equivale a \$1.950.000 COP. Es así que, el costo mensual total del proceso actual es de \$10.983.252 COP.

En el sistema automatizado propuesto, la operación se reduce a 1 operario, con un costo mensual de \$3.011.084 COP. La producción aumenta a 62.400 sobres mensuales y el desperdicio baja al 1 %, equivalente a \$234.000 COP. Sumando el costo operativo del sistema, estimado en \$133.200 COP mensuales, tenemos un costo mensual total del sistema automatizado es de \$3.378.284 COP.

Comparación de costos del proceso actual y automatizado

La diferencia entre ambos escenarios muestra un ahorro mensual de:

$$mensual = 10.983.252 - 3.378.284 = 7.604.968 \text{ COP}$$

$$Ahorro\ anual = 7.604.968 \times 12 = 91.259.616 \text{ COP}$$

Inversión inicial del sistema

Este valor incluye equipos, componentes, fabricación, montaje, integración, costos indirectos y una rentabilidad del 40 %. El detalle de los costos se presenta en el **Anexo O**, donde se clasifican los elementos por subsistemas.

La inversión estimada para la implementación del sistema automatizado es de:

$$Inversión\ total\ estimada = 56.238.000\ COP$$

Periodo de recuperación de la inversión

Para recuperarse la inversión inicial a partir del ahorro mensual generado.

$$Payback = \frac{56.238.000}{7.604.968}$$

$$Payback = 7,4\ meses$$

Esto significa que, la inversión podría recuperarse en aproximadamente 7,4 meses.

Retorno de la inversión — ROI

El retorno de la inversión permitiría medir qué tan rentable sería el proyecto durante el primer año.

$$ROI = \frac{91.259.616 - 56.238.000}{56.238.000} \times 100$$

$$ROI = 62,27\%$$

Esto nos dice que, después de recuperar la inversión inicial, el proyecto podría generar un retorno del 62,27 % durante el primer año.

Relación beneficio-costos

La relación beneficio-costos compara el ahorro anual generado con la inversión inicial.

$$B/C = \frac{91.259.616}{56.238.000}$$

$$B/C = 1,62$$

Por cada peso invertido se verían aproximadamente \$1,62 COP en beneficios durante el primer año. Ya que el valor es mayor que 1, la propuesta se considera favorable desde el punto de vista económico.

Valor Presente Neto — VPN

Para complementar el análisis, se calcula el VPN con una tasa de descuento anual del 12 % y un periodo de evaluación de 3 años.

$$VPN = -56.238.000 + \frac{91.259.616}{(1 + 0,12)^1} + \frac{91.259.616}{(1 + 0,12)^2} + \frac{91.259.616}{(1 + 0,12)^3}$$

$$VPN \approx 163.031.918 \text{ COP}$$

El VPN es positivo, y quiere decir que el proyecto generaría valor económico adicional durante el periodo evaluado.

Conclusión del análisis económico

Nuestro análisis económico muestra que la automatización propuesta tendría un comportamiento favorable frente al proceso actual. La reducción de 3 operarios a 1, la disminución del desperdicio del 10 % al 1 % y el aumento de la producción mensual permiten proyectar un ahorro mensual de \$7.604.968 COP.

Se observa que, la inversión estimada de \$56.238.000 COP se recupera en aproximadamente 7,4 meses. Además, el ROI de 62,27 %, la relación beneficio-costos de 1,62 y el VPN positivo a tres años, muestran la conveniencia económica de la propuesta.

Sin embargo, estos resultados deben entenderse como una estimación preliminar, ya que el proyecto se limita al diseño y simulación del sistema. Para una implementación real sería necesario validar los costos con cotizaciones actualizadas, pruebas físicas, consumo energético medido, costos de mantenimiento y condiciones reales de operación.

Capítulo V

Conclusiones

El diseño propuesto fue seleccionado a partir de un proceso de evaluación de alternativas, lo que permitió justificar técnicamente la arquitectura implementada y evitar que la solución final dependiera únicamente de criterios subjetivos. La matriz de decisión evidenció que la configuración elegida es la más adecuada dentro de las condiciones académicas, técnicas y de simulación del proyecto.

Durante la simulación del proyecto, se reveló el papel de la simulación en la validación del sistema, especialmente en la interfaz entre la lógica de control y la respuesta del sistema neumático. Así, los procedimientos pueden ser modificados, los parámetros de seguridad pueden ser verificados y se pueden evitar contradicciones durante las pruebas en CODESYS y FluidSIM, antes de planificar un sistema práctico que pueda tener aplicación real. Además, el grado de estabilidad de la densidad del material o el comportamiento del flujo dentro de un transportador de tornillo tuvo una influencia directa en la precisión del esquema de dosificación y, por lo tanto, se debe realizar una calibración periódica en la realidad.

Esta propuesta solicita una reducción sustancial en la intervención manual: de un proceso realizado por 3 personas a un proceso por un solo operador. Este cambio también está asociado tanto con ahorros directos de mano de obra al minimizar los costos laborales, como con la disminución de las pérdidas de producto causadas por el manejo, transporte y etapas de ajuste manual del contenido de materiales, resultando en un conjunto de procesos más eficientes en general.

Considerando la seguridad industrial, la automatización reduce la morbilidad ocupacional y las prácticas laborales peligrosas, como lesiones por trabajo repetitivo,

contacto con sustancias del producto, quemaduras al sellar y atrapamientos. Menos interferencia del operador en el proceso se traduce en mejores condiciones de trabajo y una operación más sostenible en general.

En cuanto a la viabilidad, el análisis económico indica que la propuesta es viable en un contexto industrial de manera similar a como la industria está realizando proyectos de automatización. Esto muestra la viabilidad técnica de la solución propuesta, así como la racionalidad financiera. Sin embargo, un punto crítico a señalar es que dicho proyecto tiene sus limitaciones y tiene un alcance limitado (la realización física del sistema no fue implementada, y no se desarrollaron sensores reales para medir directamente parámetros como el peso del producto). Los mismos problemas no se exploran bajo condiciones de entorno industrial natural, ni el diseño estructural del dispositivo o hardware, lo cual es un aspecto a resolver en las fases de desarrollo posteriores.

Ilustra algunos casos para la implementación en la automatización industrial del proceso de dosificación, en términos de la simulación, control y supervisión utilizando estándares económicos e industriales de TI.

Recomendaciones

Continuar con este trabajo sería implementar la realización física del sistema automatizado a través de experimentos a nivel de suelo que permitirían verificar el comportamiento del proceso, la precisión de la dosificación y la operación de interacción entre los dispositivos seleccionados bajo condiciones del mundo real. Es importante para esta etapa resaltar los cambios apropiados en el diseño, así como probar la practicidad industrial de la solución.

También se propondrá incorporar algunos sensores reales, en particular en el campo de la medición de peso, para mejorar aún más el control de la dosificación mediante la

interfaz de sistemas de retroalimentación directa y, en consecuencia, mejorar la precisión del proceso para optimizar la variabilidad del proceso del producto.

También es recomendable explorar el diseño mecánico del sistema, incluida la arquitectura, la elección de materiales y la ergonomía de la instrumentación, que son fundamentales para un uso seguro y efectivo en la industria.

En cuanto al proceso de sellado, se propone realizar una optimización del sistema térmico, evaluando variables como temperatura, tiempo de contacto y presión, con el fin de garantizar la calidad del sellado y evitar defectos en el producto final.

Finalmente, se considera importante complementar el sistema con estrategias de mantenimiento preventivo y predictivo, así como programas de capacitación para el personal operativo, lo que permitirá asegurar la continuidad del proceso, reducir fallas y mejorar la confiabilidad del sistema en el largo plazo.

Referencia

- Banks, J., Carson, J. S., Nelson, B. L., & Nicol, D. M. (2010). *Discrete-event system simulation* [Simulación de sistemas de eventos discretos] (5th ed.). Pearson.
- Bolton, W. (2015). *Programmable logic controllers* [Controladores lógicos programables] (6th ed.). Newnes.
- Boyes, W. (2010). *Instrumentation reference book* [Libro de referencia sobre instrumentación] (4th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2020). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (11.^a ed.). McGraw-Hill Education.
- Groover, M. P. (2016). *Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing* [Automatización, sistemas de producción y fabricación integrada por computadora] (4th ed.). Pearson.
- Groover, M. P. (2020). *Fundamentals of modern manufacturing: Materials, processes, and systems* [Fundamentos de la manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas] (7th ed.). Wiley.
- Hou, P., Besenhard, M. O., Halbert, G., Naftaly, M., & Markl, D. (2024). A continuous micro-feeder for cohesive pharmaceutical materials. [Un microalimentador continuo para materiales farmacéuticos cohesivos.] *International Journal of Pharmaceutics*, 662, 124528. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2024.124528>

International Electrotechnical Commission. (2013). *IEC 61131-3: Programmable controllers – Part 3: Programming languages* [Controladores programables – Parte 3: Lenguajes de programación]. <https://webstore.iec.ch/en/publication/4552>

International Organization for Standardization. (2010). *ISO 9241-210: Ergonomics of human-system interaction* [Ergonomía de la interacción humano-sistema]— *Part 210: Human-centred design for interactive systems*.
<https://www.iso.org/standard/52075.html>

International Society of Automation. (2015). *ANSI/ISA-101.01-2015: Human machine interfaces for process automation systems* [Interfaces hombre-máquina para sistemas de automatización de procesos]. <https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-101-standards>

International Organization for Standardization. (2006). *ISO 9241-110: Ergonomics of human-system interaction* [Ergonomía de la interacción humano-sistema]—*Part 110: Dialogue principles*. ISO. <https://www.iso.org/standard/38009.html>

International Organization for Standardization. (2014). *ISO 9241-112: Ergonomics of human-system interaction* [Ergonomía de la interacción humano-sistema]—*Part 112: Principles for the presentation of information*. ISO.
<https://www.iso.org/standard/53236.html>

International Organization for Standardization. (2018). *ISO 45001:2018 Occupational health and safety management systems* [Sistemas de gestión de la seguridad y salud en el trabajo] — *Requirements with guidance for use*.
<https://www.iso.org/standard/63787.html>

KWS Manufacturing Company. (s. f.). Screw conveyor engineering guide.

<https://www.kwsmfg.com/engineering-guides/screw-conveyor/>

Parr, A. (2011). *Pneumatics and hydraulics* [Neumática e hidráulica] (3rd ed.). Butterworth-Heinemann.

Perry, R. H., & Green, D. W. (2019). *Perry's chemical engineers' handbook* [Manual del ingeniero químico de Perry] (9th ed.). McGraw-Hill Education.

Petruzella, F. D. (2017). *Programmable logic controllers* [Controladores lógicos programables] (5th ed.). McGraw-Hill Education.

Striffler, N., & Voigt, T. (2023). Concepts and trends of virtual commissioning: A comprehensive review. *Journal of Manufacturing Systems* [Revista de sistemas de fabricación], 71, 664–680. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.10.013>

Tran, V.-T., Bui, N.-T., & Bui, T.-A. (2023). Application of EDEM simulation for calculating and optimizing a closed coal fly ash screw conveyor [Aplicación de la simulación EDEM para el cálculo y la optimización de un transportador de tornillo cerrado para cenizas volantes de carbón]. *Applied Sciences*, 13(22), 12169. <https://doi.org/10.3390/app132212169>

Wang, K. J., & Lee, Y. H. (2021). Digital twin design for real-time monitoring and control [Diseño de gemelos digitales para la monitorización y el control en tiempo real]. *International Journal of Production Research*, 59(18), 5401–5418. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1824085>

World Health Organization. (2014). *Good manufacturing practices for pharmaceutical products: Main principles* [Buenas prácticas de fabricación de productos farmacéuticos: Principios generales]. WHO Press.

<https://iris.who.int/handle/10665/43532>

Anexos

Anexo A.

Link Diagrama Gantt y evolución del proceso

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1EtrjlOagaOSje0W9bGI0lOL7DcWw3BKxGL8639imp24/edit?usp=sharing>

Anexo B.

Figura 1

Dosificado actual



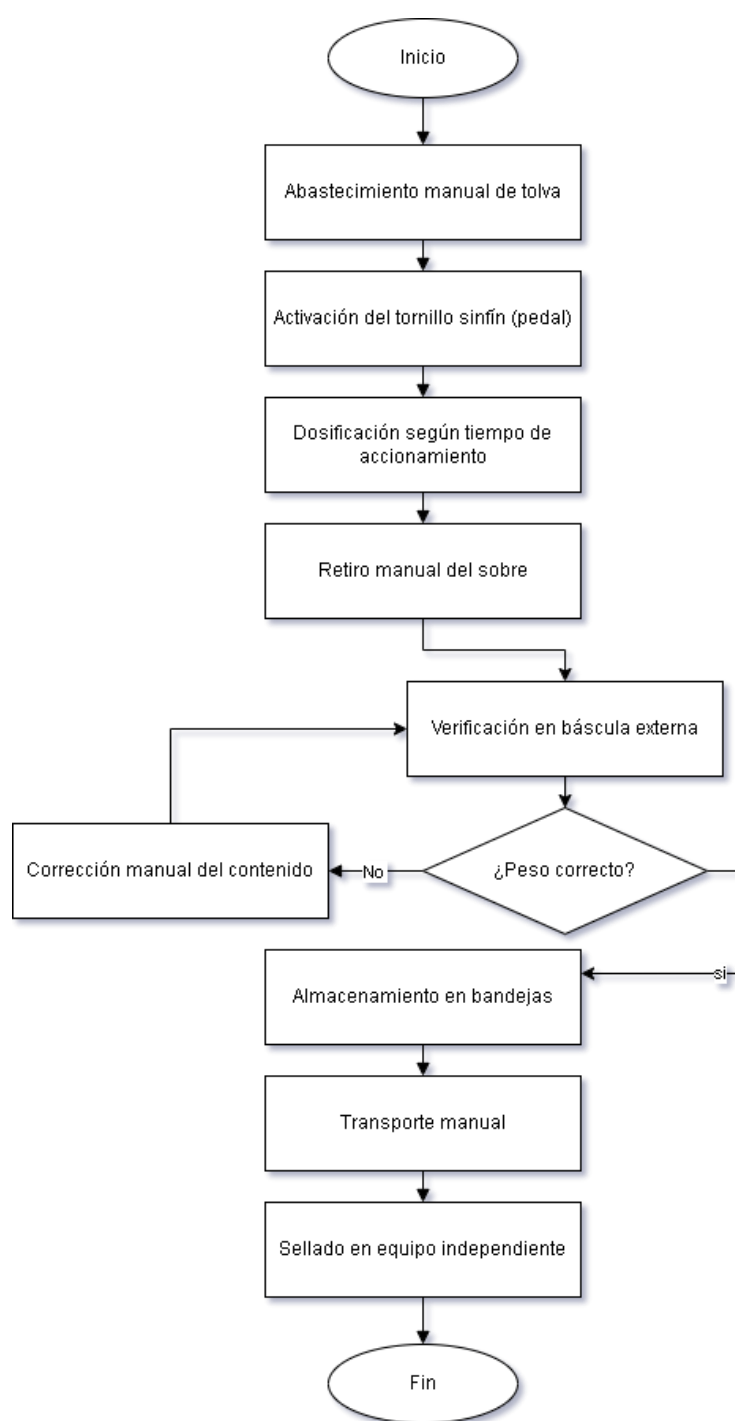
Nota: proceso semiautomático. Fuente: fotografía tomada por los autores con autorización de Proquivet SAS (2026).

Figura 2

Sellado actual



Nota: proceso semiautomático. Fuente: fotografía tomada por los autores con autorización de Proquivet SAS (2026).

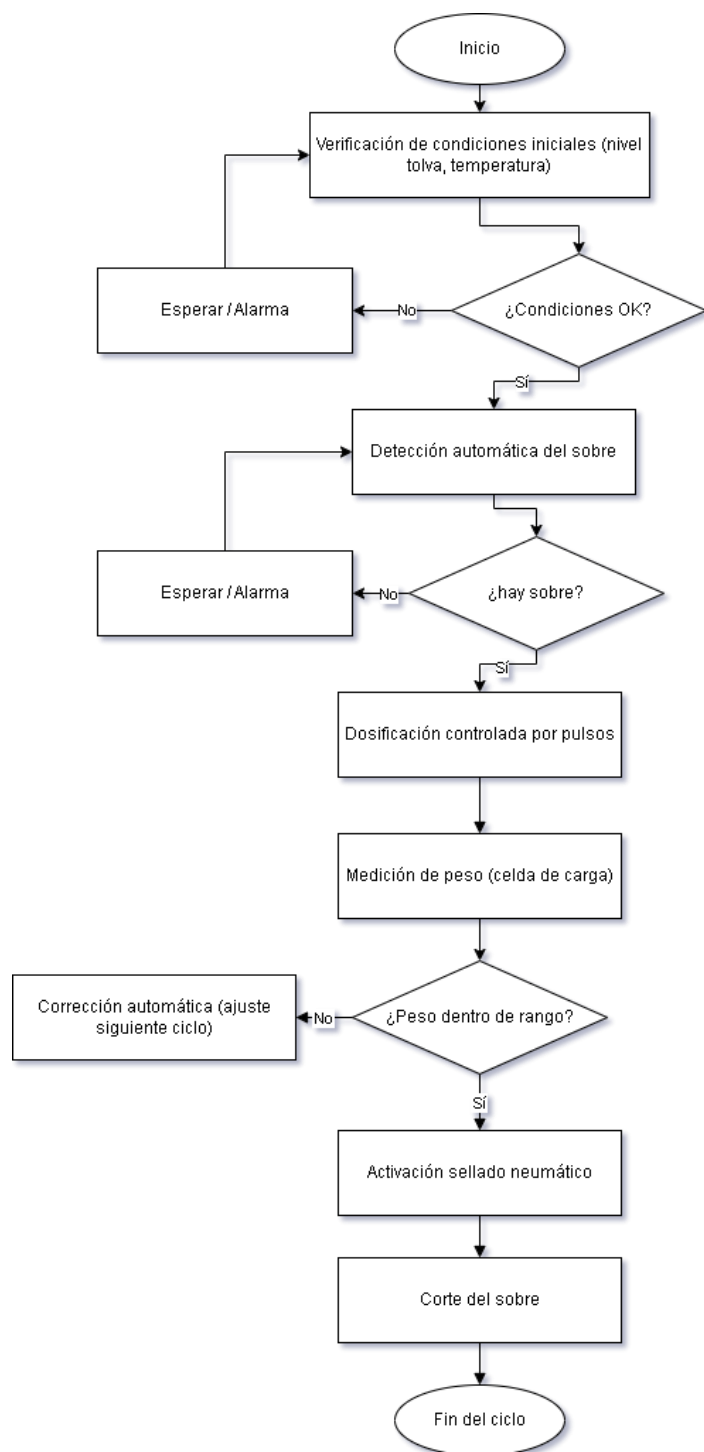
Figura 3*Diagrama del proceso actual*

Fuente: autoría propia (2026)

Anexo C.

Figura 4

Diagrama del proceso mejorado



Fuente: autoría propia (2026)

Anexo D.**Tabla 10.***Comparación proceso actual vs auto*

Aspecto	Proceso actual	Proceso automatizado
Tipo de control	Manual por tiempo	Automático por pulsos
Precisión	Baja (requiere corrección)	Alta (control + retroalimentación)
Intervención humana	Alta	Baja
Control del peso	Externo y manual	Integrado y automático
Transporte	Manual	Eliminado
Pérdidas de material	Altas	Reducidas
Trazabilidad	Nula	Integrada en HMI

Fuente: autoría propia (2026)

Anexo E.**Tabla 11.***Requerimientos de accesorios neumáticos*

Componente	Requerimiento técnico
Red de aire de planta	Suministro estable de aire comprimido a 4–6 bar
Unidad de mantenimiento	Conjunto filtro + regulador, con manómetro integrado
Filtro de aire	Retención de partículas y control de humedad para proteger válvula y cilindro
Regulador de presión	Ajuste estable en el rango de 4–6 bar
Válvula manual de corte	Permitir aislamiento del sistema para mantenimiento y seguridad
Purga	Eliminación de condensados acumulados en la línea
Manguera neumática	Tubo flexible de 6 mm de diámetro exterior, adecuado para el caudal del sistema
Racores	Compatibles con tubería de 6 mm y rosca de los elementos neumáticos
Silenciadores de escape	Reducción de ruido en las salidas de la electroválvula
Manómetro	Visualización local de la presión de trabajo

Fuente: autoría propia (2026)

Tabla 12.*Requerimientos de elementos eléctricos auxiliares*

Componente	Requerimiento técnico
Fuente de alimentación	24 VDC para PLC, sensores, válvula y señalización
Protección eléctrica	Interruptor termomagnético y fusible para protección del sistema
Paro de emergencia	Dispositivo de corte inmediato del sistema de control
Botonera	Pulsadores de inicio, paro y reset
Luces indicadoras	Señalización de encendido, operación, falla y fin de ciclo
Alarma sonora	Indicador acústico para fallas y eventos críticos
Borneras	Distribución ordenada de señales y alimentación
Cableado de control	Conductores adecuados para señales digitales, analógicas y alimentación 24 VDC
Driver de motor	Etapas de potencia compatible con el motor paso a paso y el PLC
Gabinete eléctrico	Protección y organización de los componentes de control

Fuente: autoría propia (2026)

Tabla 13.*Requerimientos de elementos mecánicos auxiliares*

Componente	Requerimiento técnico
Tolva	Geometría que garantice flujo continuo del producto granulado
Tornillo sin fin	Paso constante y transporte uniforme del material
Eje de transmisión	Acople rígido al motor con mínima holgura
Acople motor–eje	Transmisión segura del movimiento sin desalineaciones
Soporte del motor	Fijación rígida que evite vibraciones
Soporte del cilindro	Montaje firme para asegurar repetibilidad en sellado y corte
Estructura del sistema	Rigidez suficiente para soportar actuadores y elementos de proceso
Guías o base del sobre	Posicionamiento estable del empaque durante dosificación y sellado
Mordaza de sellado/corte	Superficie adecuada para cierre uniforme del sobre

Fuente: autoría propia (2026)

Anexo F.**Tabla 14.***Escala de calificación*

Calificación	Significado
1	Muy bajo cumplimiento
2	Bajo cumplimiento
3	Cumplimiento medio
4	Buen cumplimiento
5	Excelente cumplimiento

Fuente: autoría propia (2026)

Tabla 15.*Criterios de evaluación y ponderación*

Criterio	Peso
Facilidad de simulación	20 %
Compatibilidad con CODESYS/HMI	20 %
Trazabilidad de variables	15 %
Seguridad operativa	15 %
Facilidad de uso para el operador	15 %
Escalabilidad o posibilidad de mejora	10 %
Complejidad razonable para el alcance	5 %
Total	100 %

Fuente: autoría propia (2026)

Tabla 16.*Matriz de decisión para la HMI*

Criterio	Peso	D1: una pantalla	D2: pantallas separadas	D3: tablero avanzado
Facilidad de simulación	20 %	5	4	2
Compatibilidad con CODESYS	20 %	5	5	3
Trazabilidad de variables	15 %	3	5	5
Seguridad operativa	15 %	3	5	4
Facilidad de uso	15 %	2	5	3

Criterio	Peso	D1: una pantalla	D2: pantallas separadas	D3: tablero avanzado
Escalabilidad	10 %	2	4	5
Complejidad razonable	5 %	5	4	2
Puntaje ponderado	100 %	3,70	4,70	3,45

Fuente: autoría propia (2026)

Tabla 17.

Matriz de decisión para el sistema de dosificación

Criterio	Peso	B1: por tiempo	B2: por peso	B3: por pulsos
Facilidad de simulación	20 %	5	3	5
Precisión esperada	25 %	3	5	4
Compatibilidad con CODESYS	15 %	5	4	5
Facilidad de calibración	15 %	3	4	5
Trazabilidad	10 %	3	5	4
Complejidad razonable	15 %	5	3	4
Puntaje ponderado	100 %	3,95	4,05	4,55

Fuente: autoría propia (2026)

Tabla 18.

Matriz de decisión para la arquitectura general

Criterio	Peso	A1: manual asistido	A2: semiautomática	A3: automática simulada
Cumplimiento del objetivo general	25 %	2	3	5
Trazabilidad	20 %	1	3	5
Compatibilidad con Industria 4.0	20 %	1	3	5
Seguridad operativa	15 %	2	4	5
Facilidad de simulación	10 %	5	4	4
Escalabilidad	10 %	2	3	5

Criterio	Peso	A1: manual asistido	A2: semiautomática	A3: automática simulada
Puntaje ponderado	100 %	2,05	3,25	4,90

Fuente: autoría propia (2026)

Anexo G.

Tabla 19.

Parámetros del tornillo sinfín

Parámetro	Valor
Tipo	Tornillo sinfín horizontal comercial
Diámetro externo del tornillo	25 mm
Radio externo	12,5 mm
Diámetro del eje	8 mm
Paso del tornillo	25 mm
Longitud aproximada	250 mm
Material supuesto	Acero inoxidable AISI 304
Densidad aparente del polvo	0,8 g/cm ³
Factor de llenado	90 %
Motor	El ya definido en el trabajo
Supuesto de control	200 pulsos/vuelta

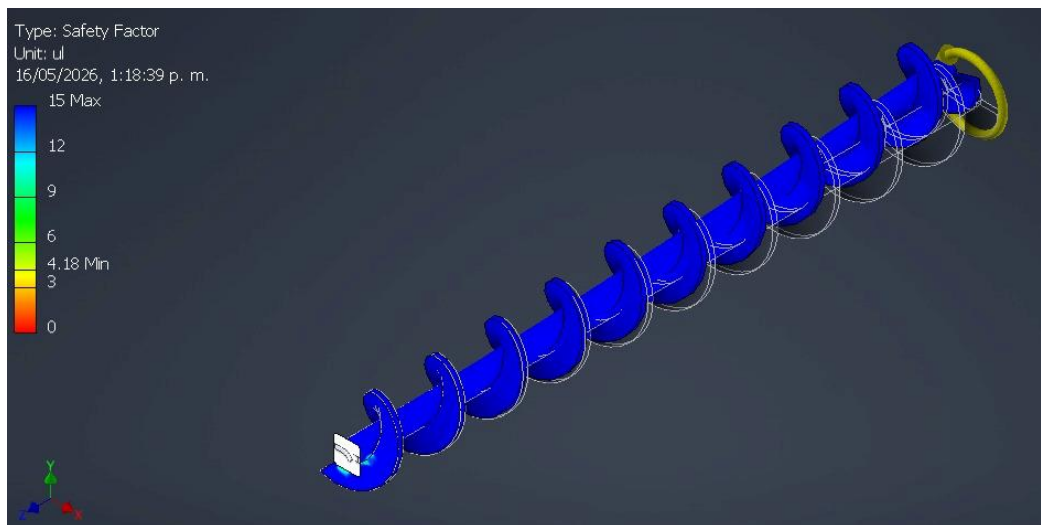
Fuente: autoría propia (2026)

Tabla 20.

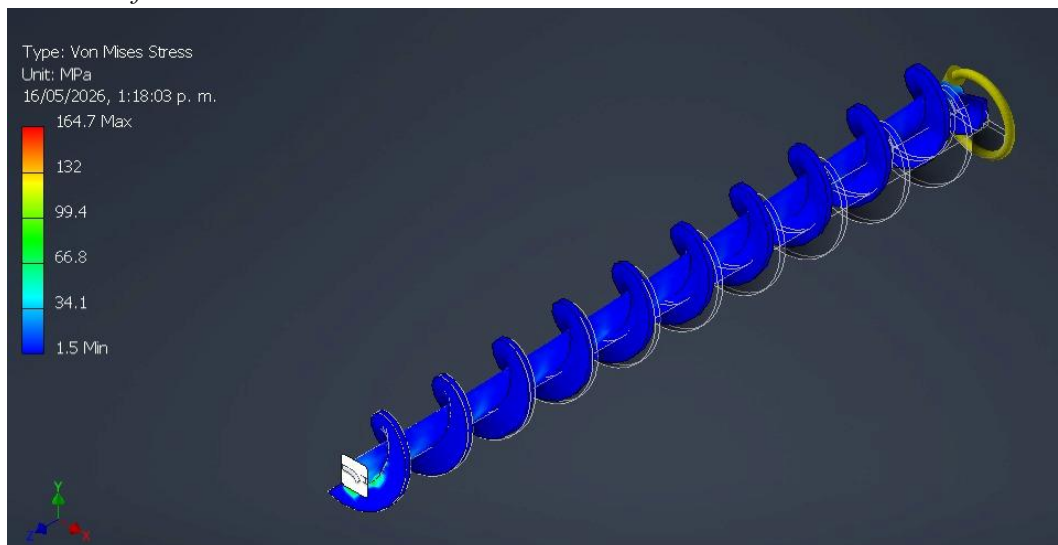
Parámetros de esfuerzos y seguridad para el tornillo sinfín

Parámetro	Valor
Torque nominal del motor	0,40 N·m
Rango de velocidad	60 a 200 rpm
Fuerza tangencial sobre el tornillo	32 N
Esfuerzo cortante en eje de 8 mm	3,98 MPa
Ángulo de torsión del eje de 8 mm	0,185°
Esfuerzo cortante en adaptador de 5 mm	16,30 MPa
Factor de seguridad eje 8 mm	31,2
Factor de seguridad adaptador 5 mm	7,6

Fuente: autoría propia (2026)

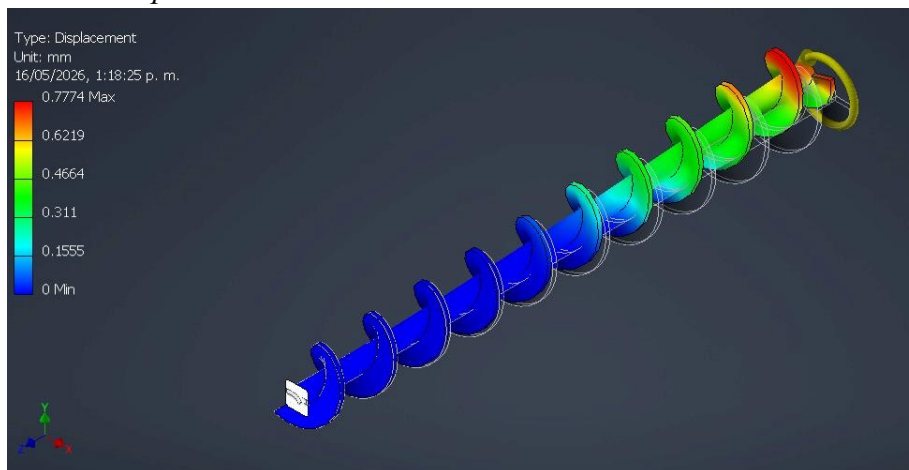
Figura 5*Factor de seguridad*

Fuente: captura de simulación realizada por los autores en Inventor-Autodesk (2026).

Figura 6*Esfuerzo de Von Mises*

Fuente: captura de simulación realizada por los autores en Inventor-Autodesk (2026).

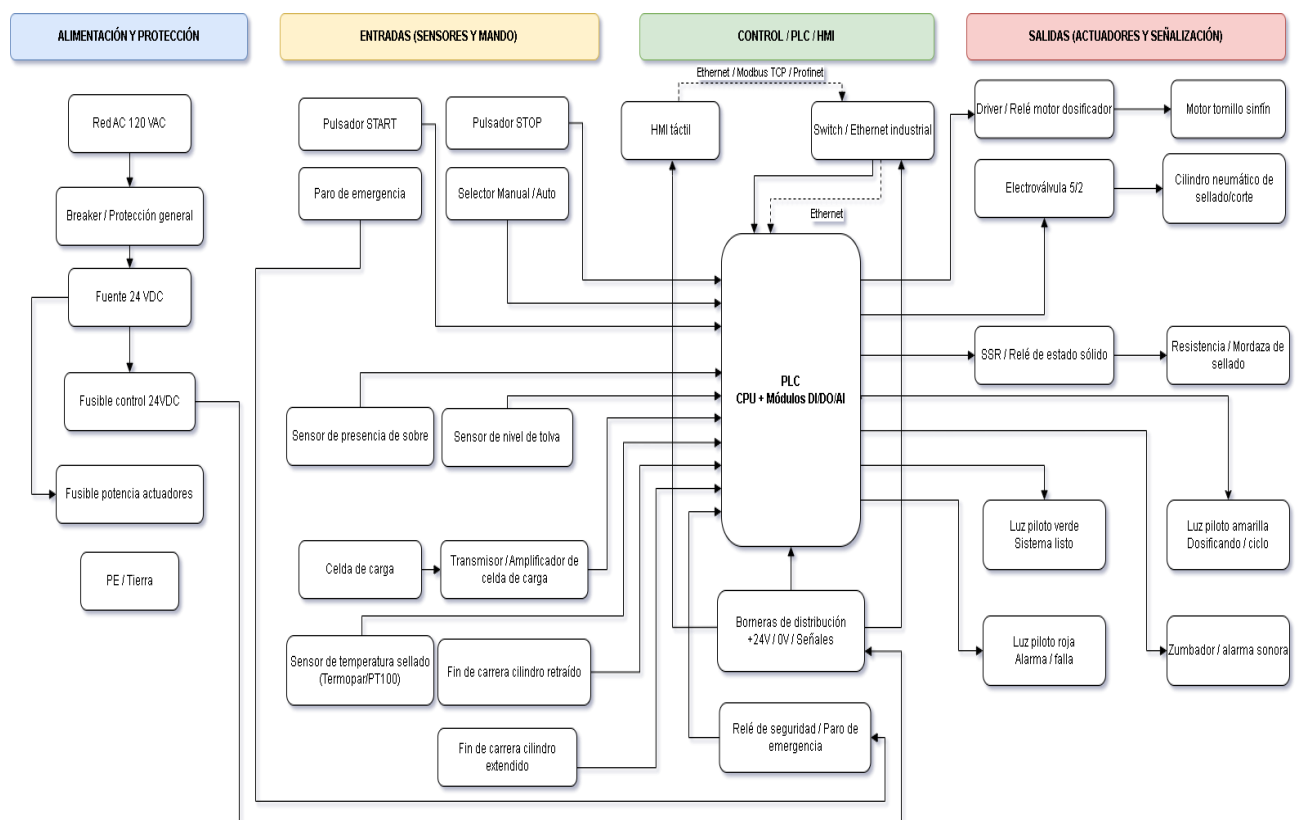
Figura 7
Desplazamiento



Fuente: captura de simulación realizada por los autores en Inventor-Autodesk (2026).

Anexo H.

Figura 8
Diagrama de conexiones del sistema

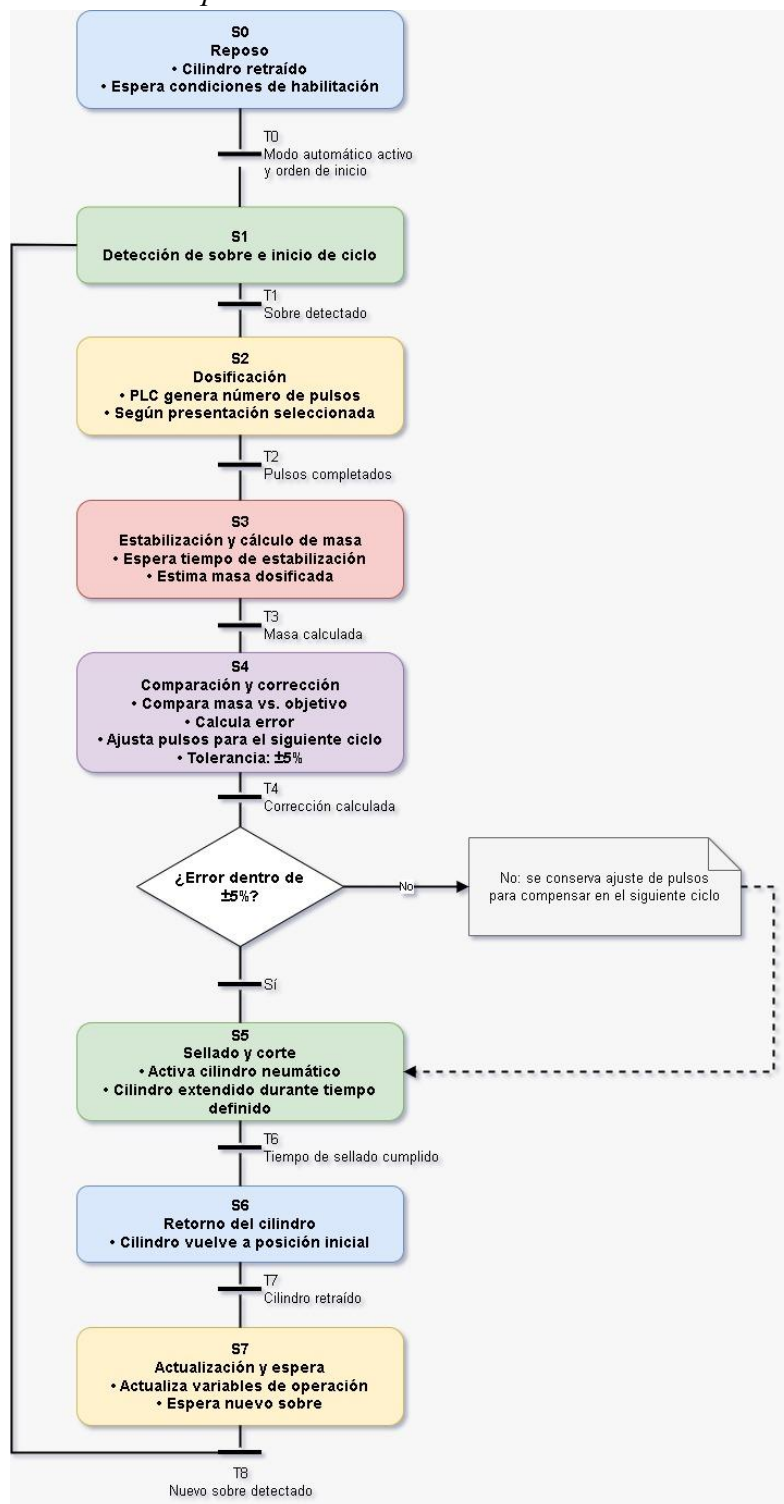


Fuente: autoría propia (2026)

Anexo I.

Figura 9

Secuencia de operación



Fuente: autoría propia (2026)

Anexo J.**Tabla 21.***Selección de PLC*

Criterio técnico	Peso	Siemens S7-1200 CPU 1212C	Schneider M221 TM221CE16R	Allen Bradley Micro820
Entradas digitales ≥ 12 requeridas	0.15	5 (14 DI)	5 (14 DI)	4 (10 DI)
Salidas digitales ≥ 8 requeridas	0.15	5 (10 DO)	4 (8 DO)	3 (6 DO)
Entradas analógicas ≥ 2	0.10	4	3	3
Generación de pulsos ≥ 5 kHz	0.15	5	4	4
Soporte Modbus TCP (Ethernet)	0.15	5	5	4
Compatibilidad con HMI	0.10	5	4	4
Robustez industrial	0.10	5	4	5
Costo	0.10	3	4	3
Total	—	4.75	4.15	3.75

Fuente: autoría propia (2026)

Tabla 22.*Selección de motor paso a paso*

Criterio técnico	Peso	17HS4401	NEMA 23	Servo
Resolución angular $\leq 1.8^\circ$ (dosificación precisa)	0.3	5	5	5
Torque suficiente para material granulado (≥ 0.4 Nm)	0.2	4	5	5
Control directo por pulsos desde PLC	0.2	5	5	4
Estabilidad a bajas velocidades (dosificación fina)	0.2	5	4	5
Costo acorde a aplicación	0.1	5	3	2
Total	—	4.7	4.4	4.2

Fuente: autoría propia (2026)

Tabla 23.*Sensor de presencia*

Criterio técnico	Peso	Omron E3Z-D61 (PNP)	SICK WL12-3 (PNP/NPN)	Autonics BR100 (NPN)
Detección de sobres (material no metálico)	0.3	5	5	4
Tiempo de respuesta ≤ 10 ms	0.2	5	5	4
Alcance 5–20 cm	0.2	5	5	4
Inmunidad a polvo	0.1	5	5	4
Compatibilidad PLC (PNP requerido)	0.2	5	5	2
Total	—	5.0	4.8	3.8

Fuente: autoría propia (2026)

Tabla 24.*Selección de sensor de nivel de tolva*

Criterio técnico	Peso	Autonics CR30-15DP (PNP)	Omron E2K-C25ME1 (NPN)	Pepperl+Fuchs CJ15-30GM-AN (PNP)
Detección de material granulado	0.30	5	4	5
Ajuste de sensibilidad	0.20	5	4	5
Alimentación industrial 24 VDC	0.10	5	5	5
Robustez para ambiente industrial	0.15	4	5	5
Compatibilidad con PLC (salida PNP requerida)	0.25	5	2	5
Total	—	4.85	3.85	5.0

Fuente: autoría propia (2026)

Tabla 25.*Selección de sensor de posición del cilindro*

Criterio técnico	Peso	Festo SME-8M-DS-24V-K-2.5-OE (PNP)	SMC D-M9P (PNP)	Airtac CS1-F (Reed, NPN/No especificado)
Compatibilidad con cilindro seleccionado	0.30	5	4	3
Detección de posición del émbolo	0.25	5	5	4

Tiempo de respuesta	0.10	5	5	4
Robustez / repetibilidad	0.15	5	5	3
Compatibilidad con PLC (salida PNP requerida)	0.20	5	5	2
Total	—	5.0	4.8	3.2

Fuente: autoría propia (2026)

Tabla 26.

Selección de sensor de temperatura

Criterio técnico	Peso	PT100 clase B + transmisor 4–20 mA	Termopar tipo K + transmisor	NTC industrial
Rango de trabajo 0–200 °C	0.25	5	5	3
Precisión	0.25	5	4	3
Integración con PLC (entrada analógica)	0.20	5	5	3
Estabilidad en sellado térmico	0.20	5	4	2
Facilidad de implementación	0.10	4	4	4
Total	—	4.9	4.5	2.9

Fuente: autoría propia (2026)

Tabla 27.

Selección de cilindro neumático

Criterio técnico	Peso	Festo ADN-32-50-A	SMC CDQ2B32-50DZ	Airtac SDA32x50
Precisión y repetibilidad (sellado uniforme)	0.3	5	5	4
Calidad de fabricación y vida útil	0.25	5	5	4
Integración con sistemas didácticos y simulación	0.2	5	4	3
Disponibilidad en entornos académicos	0.15	5	4	4
Costo	0.1	3	4	5
Total	—	4.7	4.5	4.1

Fuente: autoría propia (2026)

Tabla 28.*Selección de electroválvula*

Criterio técnico	Peso	Festo VUVG-LK14-M52-AT-G18-1H2L	SMC SY5120-5LZD-01	Airtac 4V210-08
Configuración 5/2 monoestable	0.25	5	5	4
Operación a 24 VDC	0.15	5	5	5
Tiempo de respuesta ≤ 50 ms	0.20	5	5	4
Caudal nominal ≥ 20 NI/min para cilindro $\varnothing 32$ mm $\times$ 50 mm	0.25	5	5	4
Compatibilidad con el sistema neumático seleccionado	0.15	5	4	4
Total	—	5.0	4.85	4.15

Fuente: autoría propia (2026)

Tabla 29.*Celda de carga*

Criterio técnico	Peso	TAL220 200 g	TAL221 100 g	500 g
Rango adecuado para 20–100 g	0.3	5	3	5
Precisión $\leq \pm 0.5$ g	0.3	5	5	3
Sensibilidad para baja masa	0.2	5	5	3
Integración con PLC (analógica)	0.2	5	5	4
Total	—	5.0	4.2	3.8

Fuente: autoría propia (2026)

Tabla 30.*Selección de HMI*

Criterio técnico	Peso	Siemens KTP700 Basic	Weintek cMT3072XH	Schneider HMIGTO2310
Compatibilidad con PLC seleccionado (misma marca)	0.25	5	3	3
Integración con entorno industrial de programación y supervisión	0.20	5	3	4
Comunicación industrial (Modbus TCP / Ethernet)	0.20	4	5	5
Compatibilidad con supervisión mediante protocolos industriales	0.15	3	5	4

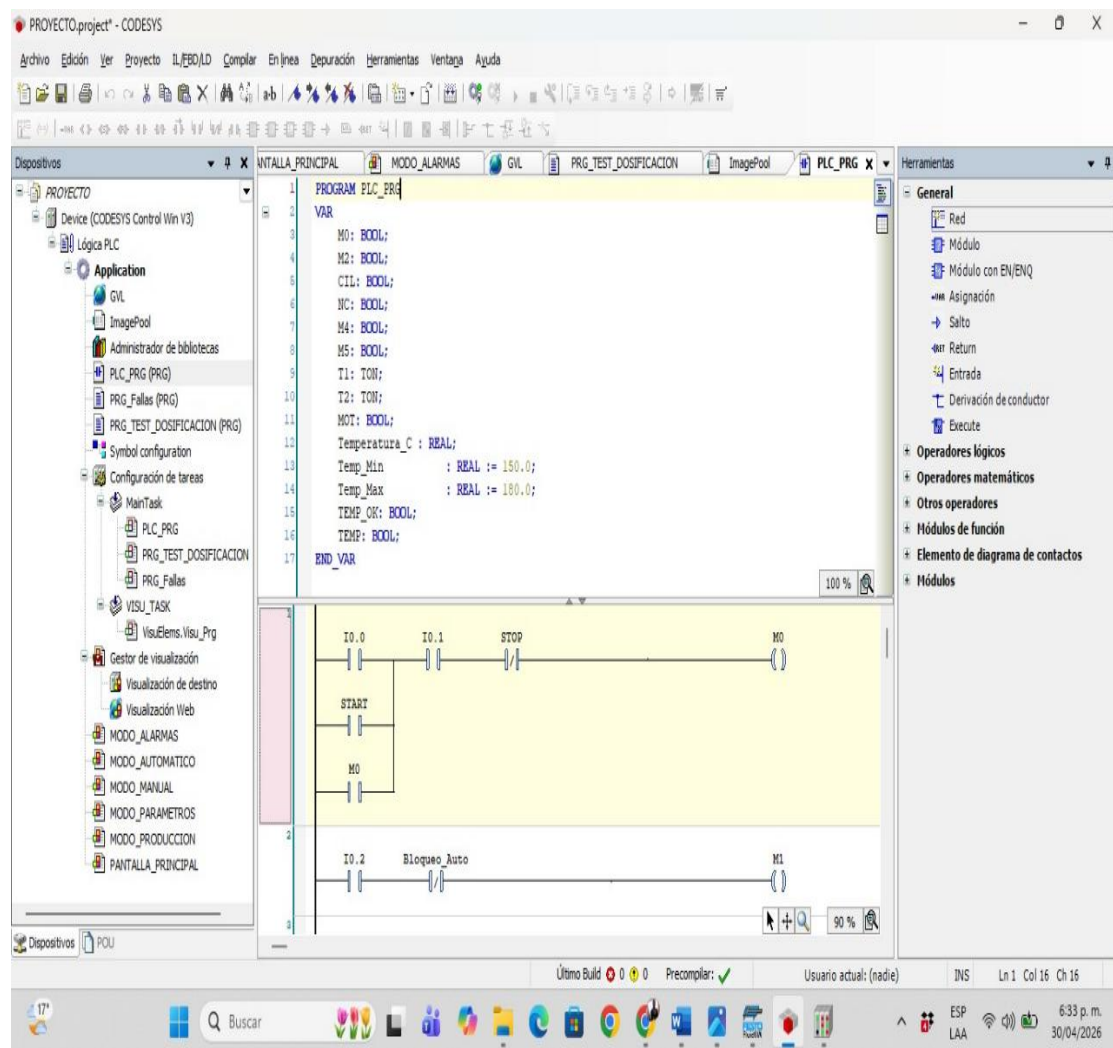
Visualización de variables, alarmas y pantallas	0.10	5	5	5
Robustez industrial	0.05	5	5	5
Costo	0.05	3	4	3
Total	—	4.45	4.4	4.3

Fuente: autoría propia (2026)

Anexo K.

Figura 10

implementación de la lógica de control



Fuente: captura de simulación realizada por los autores en CODESYS (2026).

Anexo L.

Figura 11

Diseño de la interfaz HMI Pantalla principal



Fuente: captura de simulación realizada por los autores en CODESYS (2026).

Figura 12

Diseño de la interfaz HMI modo automático

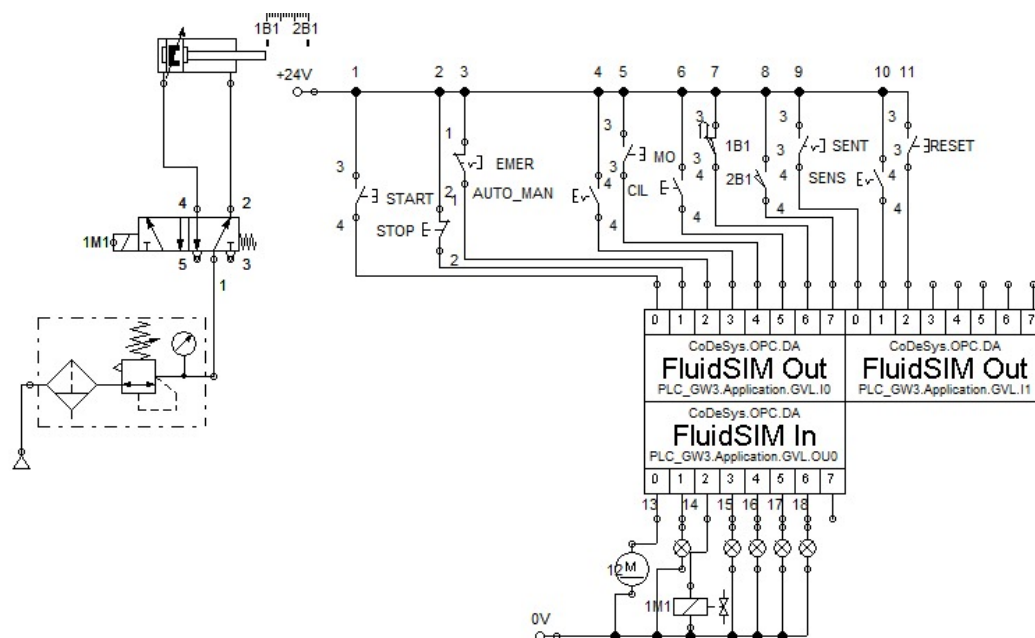


Fuente: captura de simulación realizada por los autores en CODESYS (2026).

Anexo M.

Figura 13

Diseño sistema neumático en FluidSIM



Fuente: captura de simulación realizada por los autores en FluidSIM (2026).

Anexo N.

Evidencias de funcionamiento link

<https://drive.google.com/file/d/1QIX9F-HKvgH-lfXBbA7NIUFTZ1wUC1Dx/view?usp=sharing>

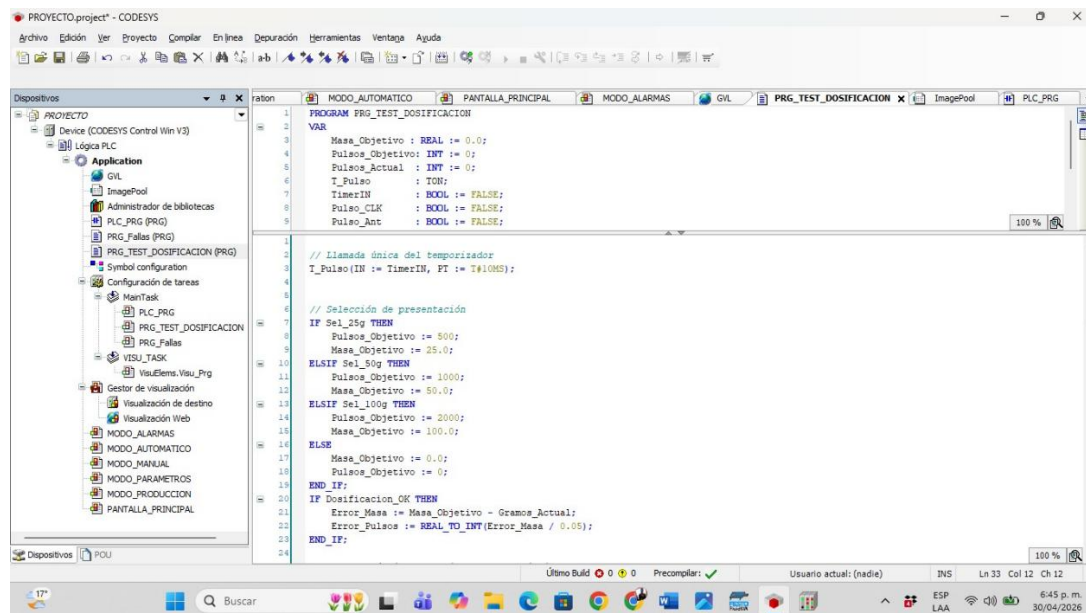
Tabla 31

Matriz de verificación de funcionamiento

Prueba	Condición inicial	Acción realizada	Resultado esperado	Resultado obtenido	Cumple
PF-01 Arranque	Sistema detenido, paro de emergencia desactivado	Activar modo automático	El sistema pasa a estado de espera	El sistema queda habilitado en HMI	Sí
PF-02 Presencia de sobre	Sensor de sobre desactivado	Presionar inicio	El ciclo no debe iniciar	Se bloquea la dosificación y se genera alarma	Sí

Prueba	Condición inicial	Acción realizada	Resultado esperado	Resultado obtenido	Cumple
PF-03 Dosificación 20 g	Presentación 25g seleccionada	Iniciar ciclo	El motor ejecuta los pulsos asignados	Se activa la salida del motor hasta completar pulsos	Sí
PF-04 Dosificación 50 g	Presentación 50g seleccionada	Iniciar ciclo	El sistema dosifica mayor cantidad de pulsos	El contador de pulsos alcanza el valor programado	Sí
PF-05 Temperatura baja	Temperatura menor al mínimo	Iniciar sellado	El sellado debe bloquearse	Se activa alarma de temperatura baja	Sí
PF-06 Temperatura en rango	Temperatura dentro del rango permitido	Finalizar dosificación	Se activa el sellado	El cilindro de sellado se activa por el tiempo configurado	Sí
PF-07 Fin de ciclo	Dosificación y sellado completados	Terminar secuencia	Incrementar contador de sobres	El contador aumenta en una unidad	Sí
PF-08 Masa total	Ciclo completado	Registrar producción	Acumular masa producida	La HMI muestra masa total acumulada	Sí
PF-09 Paro de emergencia	Sistema en operación	Activar paro	Todas las salidas deben apagarse	Motor y sellado se desactivan	Sí
PF-10 Reinicio	Alarma activa	Resetear falla	El sistema vuelve a espera segura	La alarma se limpia y el sistema queda listo	Sí

Nota: comprobación de funcionamiento. Fuente: autoría propia (2026)

Figura 14*Corrección de error en Codesys*

Fuente: captura de simulación realizada por los autores en CODESYS (2026).

Anexo O.**Tabla 32***Costos Sistema de control e instrumentación*

Elemento	Cantidad	Valor unitario (COP)	Subtotal (COP)	Descripción
PLC Siemens S7-1200 CPU 1212C	1	2.200.000	2.200.000	Control principal del sistema
HMI Siemens KTP700	1	3.200.000	3.200.000	Interfaz de operación
Sensores industriales (presencia, nivel, posición)	4	300.000	1.200.000	Censado del proceso
Celda de carga industrial + módulo	1	900.000	900.000	Medición de masa
Cableado industrial y comunicación	1	800.000	800.000	Red de datos y conexión
Subtotal sistema de control	—	—	8.300.000	—

Fuente: autoría propia (2026)

Tabla 33.*Costos Sistema mecánico de dosificación*

Elemento	Cantidad	Valor unitario	Subtotal	Descripción
Tolva acero inoxidable	1	1.200.000	1.200.000	Almacenamiento producto
Tornillo sinfin mecanizado	1	1.500.000	1.500.000	Dosificación controlada
Estructura metálica industrial	1	2.500.000	2.500.000	Soporte del sistema
Soportes y guías	1	1.200.000	1.200.000	Posicionamiento del sobre
Acoples industriales	1	600.000	600.000	Transmisión mecánica
Subtotal sistema mecánico	—	—	7.000.000	—

Fuente: autoría propia (2026)

Tabla 34.*Costos Sistema neumático*

Elemento	Cantidad	Valor unitario	Subtotal	Descripción
Cilindro Festo ADN-32-50	1	550.000	550.000	Sellado del sobre
Electroválvula 5/2 monoestable Festo	1	420.000	420.000	Control neumático
Unidad FRL (filtro-regulador)	1	250.000	250.000	Tratamiento de aire
Válvula manual de corte	1	180.000	180.000	Seguridad
Mangueras y racores	1	300.000	300.000	Conexión neumática
Subtotal sistema neumático	—	—	1.700.000	—

Fuente: autoría propia (2026)

Tabla 35.*Costos Sistema eléctrico y protección*

Elemento	Cantidad	Valor unitario	Subtotal	Descripción
Gabinete industrial	1	1.200.000	1.200.000	Protección eléctrica
Protecciones (breaker, fusibles)	1	900.000	900.000	Seguridad eléctrica

Cableado industrial completo	1	1.200.000	1.200.000	Potencia y control
Borneras, riel DIN y canaletas	1	800.000	800.000	Organización
Subtotal sistema eléctrico	—	—	4.100.000	—

Fuente: autoría propia (2026)

Tabla 36.

Costos Sistema térmico de sellado

Elemento	Cantidad	Valor unitario	Subtotal	Descripción
Mordaza térmica de sellado	1	600.000	600.000	Sellado del sobre
Resistencia industrial	1	300.000	300.000	Generación de calor
Controlador de temperatura	1	350.000	350.000	Control térmico
Relé de estado sólido (SSR)	1	250.000	250.000	Control eléctrico
Aislamiento térmico	1	200.000	200.000	Seguridad
Cableado térmico	1	100.000	100.000	Conexión
Subtotal sistema térmico	—	—	1.800.000	—

Fuente: autoría propia (2026)

Tabla 37.

Costos Accesorios y montaje

Elemento	Cantidad	Valor unitario	Subtotal	Descripción
Tornillería y fijaciones	1	300.000	300.000	Ensamble
Guardas de seguridad	1	400.000	400.000	Protección operador
Canaletas adicionales	1	300.000	300.000	Organización
Etiquetado industrial	1	200.000	200.000	Identificación
Consumibles de fabricación	1	400.000	400.000	Montaje
Mano de pruebas y ajustes	1	400.000	400.000	Puesta en marcha
Subtotales accesorios	—	—	2.000.000	—

Fuente: autoría propia (2026)

Tabla 38.

Resumen de costos

Concepto	Valor (COP)
Sistema de control	8.300.000

Sistema mecánico	7.000.000
Sistema neumático	1.700.000
Sistema eléctrico	4.100.000
Sistema térmico	1.800.000
Accesorios	2.000.000
Subtotal equipos	24.900.000
Fabricación (200 h × 30.000)	6.000.000
Costos indirectos (30%)	9.270.000
Costo base	40.170.000
Rentabilidad (40%)	16.068.000
INVERSIÓN TOTAL	56.238.000 COP

Fuente: autoría propia (2026)