



REPÚBLICA DE PANAMÁ
UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA
LICENCIATURA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL CON ÉNFASIS EN CALIDAD Y
PRODUCTIVIDAD

IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL AUTOMATIZADO CON CONTROLADOR
LÓGICO PROGRAMABLE PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL ENSACADO EN LA
INDUSTRIA PANAMEÑA DE CEMENTO

TRABAJO DE GRADO DE LICENCIATURA PRESENTADO PARA OPTAR AL
GRADO DE:
LICENCIADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL CON ÉNFASIS EN CALIDAD Y
PRODUCTIVIDAD

TUTOR: Mgtr. Robert Anthony Nicholson Fernández

AUTOR: Jahir Alejandro Gaona Cruz

Ciudad de Panamá, 26 de junio de 2026



REPÚBLICA DE PANAMÁ
UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

**LICENCIATURA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL CON ÉNFASIS EN CALIDAD Y
PRODUCTIVIDAD**

**IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL AUTOMATIZADO CON CONTROLADOR
LÓGICO PROGRAMABLE PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL ENSACADO EN LA
INDUSTRIA PANAMEÑA DE CEMENTO**

**TRABAJO DE GRADO DE LICENCIATURA PRESENTADO PARA OPTAR AL
GRADO DE:**
**LICENCIADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL CON ÉNFASIS EN CALIDAD Y
PRODUCTIVIDAD**

AUTOR: Jahir Alejandro Gaona Cruz

Ciudad de Panamá, 26 de junio de 2026



Ciudad de Panamá, 26 de mayo de 2026

Profesor (a)

Héctor Mazurkiewicz

Coordinador del Comité de Titulación de Estudios de Grado y Postgrado

Presente.

En mi carácter de Tutor del Trabajo de Grado de Licenciatura, presentado por el Bachiller, Jahir Alejandro Gaona Cruz, para optar al grado de Licenciado en Ingeniería Industrial con énfasis en Calidad y Productividad considero que el trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del Jurado examinador que se designe.

Atentamente,

Mgtr. Robert Anthony Nicholson Fernández



UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

**INFORME DE ACTIVIDADES DE TUTORÍA OPCIÓN DE TITULACIÓN DE
TRABAJO DE GRADO DE LICENCIATURA**

Carrera de Licenciatura en ingeniería industrial con énfasis en calidad y productividad

Estudiante: Jahir Alejandro Gaona Cruz Cédula de identidad no. 2-726-2091

Tutor: Mgtr. Robert Anthony Nicholson Fernández

Título del trabajo de grado: IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL AUTOMATIZADO
CON CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL
ENSACADO EN LA INDUSTRIA PANAMEÑA DE CEMENTO

Línea de Investigación: Automatización y Control de procesos industriales.

Informe de actividades

SESIÓN	FECHA	HORA REUNIÓN	ASPECTO TRATADO	OBSERVACIÓN
1	11/05/2026	6:30 p.m.	Presentación del anteproyecto y lineamientos generales de investigación.	Aprobado
2	18/05/2026	7:00 p.m.	Lineamientos para construcción del anteproyecto y estructura del documento.	Aprobado

SESIÓN	FECHA	HORA REUNIÓN	ASPECTO TRATADO	OBSERVACIÓN
3	27/05/2026	6:15 p.m.	Revisión de planteamiento de problema, objetivos y justificación.	Con observaciones
4	01/06/2026	8:30 p.m.	Revisión del marco teórico y bases legales.	Aprobado
5	08/06/2026	6:30 p.m.	Revisión de metodología y técnicas de recolección de datos.	Aprobado
6	16/06/2026	6:30 p.m.	Revisión de resultados y análisis del sistema propuesto.	Aprobado
7	20/06/2026	7:30 p.m.	Revisión final: conclusiones, recomendaciones y referencias.	Aprobado para presentación

Título definitivo: IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL AUTOMATIZADO CON CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL ENSACADO EN LA INDUSTRIA PANAMEÑA DE CEMENTO

Comentarios finales acerca de la investigación: Declaramos que las especificaciones anteriores representan el proceso de dirección del trabajo de grado arriba mencionado.

Firma del tutor



Firma del estudiante



DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero dar gracias a Dios que siempre ha sido mi guía y mi fortaleza en este arduo camino profesional, gracias por todo lo que has hecho por mi Dios, por lo que me das días tras día y por todo lo que está por venir, por darme la sabiduría para poderme conducir.

De una forma muy especial, doy las gracias al profesor Robert Anthony Nicholson Fernández, por acompañarme y guiarme en la estructuración de este trabajo, por corregirme para la efectividad de este trabajo.

A mi hija, amigos y a toda aquella persona que en algún momento de este proceso me dieron una palabra de esperanza, gracias por sus buenos deseos y palabras de estímulo, todas ellas las he recogido en mi corazón.

Agradezco profundamente a Cemento Chagres por haber contribuido en mi formación profesional, brindándome la oportunidad de crecer, aprender y acercarme al logro de convertirme en un profesional. Su apoyo fue parte importante de este camino.

“Cada paso dado con dedicación y amor nos acerca a convertirnos en la mejor versión de nosotros mismos.”

Tabla de Contenidos

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTO	vi
Tabla de Contenidos	vii
Índice de Tablas	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT.....	xii
INTRODUCCIÓN	xiii
CAPÍTULO I	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1 Definición del problema.....	2
1.2 Información de la empresa beneficiada.....	2
1.3 Antecedentes de la situación problemática	3
1.4 Formulación del Problema	6
1.5 Objetivos	6
1.5.1 Objetivo general	6
1.5.2 Objetivos específicos.....	6
1.6 Justificación.....	7
1.7 Alcance y delimitación del proyecto	8
CAPÍTULO II.....	9
MARCO TEÓRICO.....	9
2.1 Antecedentes de investigación	10
2.2 Bases teóricas	12
2.2.1 Automatización Industrial	12
2.2.2 Controlador Lógico Programable (PLC)	12
2.2.3 Índice Blaine y su Efecto en el Proceso de Ensacado	13
2.2.4 Sistema de Pesaje Industrial	14
2.2.5 Máquina Ensacadora Tipo Rotopacker.....	14
2.2.6 Control PID en procesos de pesaje	15
2.2.7 Sistema SCADA e Interfaz HMI	15
2.2.8 Indicadores de Eficiencia Operativa (OEE)	15
2.3 Bases legales	16

2.3.1 Ley No. 59 de 29 de julio de 1999	16
2.3.2 Norma Técnica Panameña COPANIT 47-1999	16
2.3.3 Norma IEC 61131-3	17
2.3.4 Norma ASTM C204-23	17
2.3.5 Decreto Ejecutivo No. 306 de 2002 - Control de ruido en ambientes laborales	17
2.4 Términos Básicos	17
CAPÍTULO III.....	20
METODOLOGÍA.....	20
3.1 Tipo y diseño de investigación.....	21
3.2 Población y Muestra.....	21
3.3 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	22
3.3.1 Técnicas	22
3.3.2 Instrumentos	23
CAPÍTULO IV.....	27
RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	27
4.1 Diagnóstico del Proceso Actual de Ensacado	28
4.1.1 Análisis de la Variabilidad del Peso de los Sacos	28
4.2 Identificación de Variables Críticas del Proceso.....	32
4.3 Diseño de la Lógica de Control PLC	33
4.3.1 Selección del Hardware	33
4.3.2 Arquitectura del Sistema de Control	35
4.3.3 Listado de Entradas y Salidas (I/O).....	35
4.3.4 Lógica de Control- Descripción del Programa Ladder.....	38
4.5 Indicadores de desempeño proyectados para la Implementación Definitiva	44
CONCLUSIONES	46
CAPÍTULO VI.....	48
RECOMENDACIONES.....	48
Referencias.....	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Vista general de la máquina ensacadora tipo Rotopacker en la línea de producción de Cemento Chagres.	4
Figura 2: Panel de control actual de la ensacadora Rotopacker, con parámetros de llenado fijos ajustados manualmente por el operador.	5
Figura 3: Saco de cemento con peso fuera de la especificación nominal de 42.5 kg, registrado durante la fase de diagnóstico.	5
Figura 4: Observación directa del proceso de ensacado durante la fase de diagnóstico de campo.	25
Figura 5: Registro de datos de producción y control de calidad correspondientes al turno observado.	26
Figura 6: Lectura de peso fuera de rango en la báscula de la ensacadora durante el período de línea base.	29
Figura 7: Registro histórico de paradas no programadas de la línea de ensacado correspondiente al trimestre evaluado.	30
Figura 8: Distribución de Paradas No Programadas por Semana (min).	31
Figura 9: Tendencia del Total de Paradas por Semana.	31
Figura 10: Controlador lógico programable Siemens S7-1200 seleccionado para la propuesta de automatización.	33
Figura 11: Diagrama de flujo de la lógica aplicada.	37
Figura 12: Rutina principal OB1 del PLC.	38
Figura 13: Subrutina de ajuste adaptativo por índice Blaine.	39
Figura 14: Subrutina de alarmas y control de peso.	40
Figura 15: Lectura de peso conforme a especificación (42.5 kg) registrada durante la prueba piloto de validación del sistema PLC.	43

Índice de Tablas

Tabla 1 Variables de estudio.....	23
Tabla 2 Registro estadístico de variaciones de peso (muestra de 1,500 sacos, enero-marzo 2026).	28
Tabla 3 Frecuencia y duración de paradas no programadas (enero-marzo 2026).	30
Tabla 4 Variables críticas del proceso de ensacado e instrumentación asociada.	32
Tabla 5 Especificaciones técnicas del hardware del sistema de control PLC propuesto.....	34
Tabla 6 Listado de entradas y salidas del sistema de control PLC.	35
Tabla 7 Parámetros de llenado ajustados por rango de índice de Blaine.....	41
Tabla 8 Resultados de la prueba piloto de validación.....	41
Tabla 9 Indicadores de desempeño proyectados tras la implementación definitiva del PLC.....	44



REPÚBLICA DE PANAMÁ
UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

**IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL AUTOMATIZADO CON CONTROLADOR
LÓGICO PROGRAMABLE PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL ENSACADO EN LA
INDUSTRIA PANAMEÑA DE CEMENTO**

TUTOR: Robert Anthony Nicholson Fernández

AUTOR: Jahir Alejandro Gaona Cruz

AÑO: 2026

RESUMEN

La investigación tuvo como propósito diseñar y validar una propuesta de implementación de un sistema de control automatizado mediante controlador lógico programable (PLC) para optimizar el ensacado de cemento en Cemento Chagres. El estudio respondió a variaciones de peso, sobrellenado, subllenado y paradas no programadas vinculadas al índice Blaine y al uso de parámetros fijos de control. La metodología fue aplicada, descriptiva y de campo, con observación directa, entrevistas y análisis de registros operativos. La propuesta integró PLC Siemens S7-1200, módulo SIWAREX WP231 e interfaz HMI para ajustar dinámicamente los parámetros de llenado. La prueba piloto evidenció una reducción de 87.1 % en el error de pesaje, disminución de 71.6 % en paradas no programadas, incremento de 11.6 % en velocidad de producción y proyección de OEE de 88.5 %. Se concluye que el control PLC adaptativo es técnicamente viable para mejorar precisión, reducir desperdicios y elevar la eficiencia operativa.

Palabras clave: automatización industrial, PLC, ensacado de cemento, control de proceso, productividad.



REPUBLIC OF PANAMA
INTERNATIONAL UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
FACULTY OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY

**IMPLEMENTATION OF AUTOMATED CONTROL WITH PROGRAMMABLE
LOGIC CONTROLLER FOR BAGGING OPTIMIZATION IN THE PANAMANIAN
CEMENT INDUSTRY**

TUTOR: Robert Anthony Nicholson Fernández

AUTHOR: Jahir Alejandro Gaona Cruz

YEAR: 2026

ABSTRACT

The purpose of this research was to design and validate an implementation proposal for an automated control system using a programmable logic controller (PLC) to optimize cement bagging at Cemento Chagres. The study addressed weight variation, overfilling, underfilling, and unscheduled stoppages linked to Blaine fineness and the use of fixed control parameters. The methodology was applied, descriptive, and field-based, using direct observation, interviews, and operational record analysis. The proposal integrated a Siemens S7-1200 PLC, a SIWAREX WP231 weighing module, and an HMI interface to dynamically adjust filling parameters. The pilot test showed an 87.1% reduction in weighing error, a 71.6% decrease in unscheduled stoppages, an 11.6% increase in production speed, and a projected OEE of 88.5%. It is concluded that adaptive PLC control is technically feasible for improving weighing accuracy, reducing waste, and increasing operational efficiency.

Keywords: industrial automation, PLC, cement bagging, process control, productivity.

INTRODUCCIÓN

La automatización industrial se ha consolidado como un enfoque determinante para la competitividad de los sectores manufactureros a nivel mundial. Su incorporación en los procesos productivos permite mejorar la eficiencia, disminuir la variabilidad, reducir costos operativos y fortalecer la repetibilidad de las operaciones (Groover, 2019; Lamb, 2018). En economías en desarrollo como la panameña, la adopción de tecnologías de control avanzado representa una oportunidad estratégica para elevar los estándares de calidad y productividad. La industria del cemento, como sector proveedor esencial para el desarrollo de infraestructura nacional, no es ajena a esta necesidad de modernización tecnológica.

En Cemento Chagres, empresa panameña con instalaciones en Pacora, provincia de Panamá, el proceso de ensacado de cemento Portland constituye una etapa crítica de la cadena productiva. Este proceso opera con una máquina tipo Rotopacker cuyo sistema de control actual se basa en parámetros fijos, sin capacidad de respuesta adaptativa ante las variaciones naturales del material procesado. La finura del cemento, medida mediante el índice de Blaine, fluctúa durante la producción y tiene incidencia directa sobre el comportamiento del flujo del material durante el llenado de sacos (ASTM International, 2023); Topaloğlu et al., 2026). Esta dinámica genera condiciones de sobrellenado y subllenado que se traducen en pérdidas de material, rechazo de producto y paradas no programadas de la línea.

Ante esta problemática, el presente trabajo de grado propone el diseño y validación de un sistema de control automatizado mediante PLC orientado a optimizar el proceso de ensacado. La investigación se desarrolla bajo un enfoque aplicado y descriptivo, con acceso directo a la planta productiva, sus equipos y registros operativos, en virtud del cargo desempeñado por el autor como Supervisor de Instrumentación y Control Industrial en Cemento Chagres. El diseño se fundamenta en principios de automatización industrial, control de procesos y lenguajes de programación para PLC establecidos por la normativa IEC 61131-3 (Bolton, 2015; IEC, 2025).

El documento está estructurado en seis capítulos. El Capítulo I presenta el planteamiento del problema, los objetivos, la justificación y el alcance de la investigación. El Capítulo II desarrolla el marco teórico, que incluye antecedentes de investigación, bases teóricas, bases legales aplicables y términos técnicos. El Capítulo III describe la metodología empleada, incluyendo el

tipo de investigación, las técnicas e instrumentos de recolección de datos y el procedimiento seguido. El Capítulo IV expone los resultados del diagnóstico, el diseño lógico del control propuesto y los indicadores de desempeño proyectados. El Capítulo V presenta las conclusiones y el Capítulo VI recoge las recomendaciones para la implementación definitiva del sistema.

Con este proyecto se espera contribuir al avance de la automatización industrial en el sector cementero en Panamá, demostrando la viabilidad técnica y los beneficios operativos de la implementación de control PLC adaptativo en procesos de ensacado de materiales en polvo de alta variabilidad.

CAPÍTULO I
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El presente capítulo describe la situación problemática identificada en el proceso de ensacado de Cemento Chagres, estableciendo el contexto operativo que motivó esta investigación. Se presentan la formulación del problema, los objetivos generales y específicos, la justificación del estudio y la delimitación del alcance del proyecto.

1.1 Definición del problema

En la actualidad, el proceso de ensacado de Cemento Chagres presenta deficiencias operativas que afectan directamente la eficiencia, la productividad y la estabilidad de la línea de producción. Uno de los principales problemas identificados corresponde a las variaciones de peso de los sacos de cemento, las cuales generan condiciones de sobrellenado y subllenado durante el despacho de producto terminado. Estas inconsistencias ocasionan pérdidas de material, incrementan los costos operativos y afectan los estándares de calidad establecidos por la empresa.

La problemática se origina principalmente por las variaciones del índice de finura del cemento (Blaine), las cuales modifican el comportamiento del flujo del material durante el llenado de los sacos. El método Blaine permite estimar la superficie específica del cemento mediante permeabilidad al aire, por lo que constituye una variable técnica relevante para caracterizar la finura del material (ASTM International, 2023). El sistema de control actual opera mediante parámetros fijos y ajustes manuales, lo que limita su capacidad de respuesta automática ante cambios del proceso. Como consecuencia, los operadores deben realizar correcciones frecuentes para mantener la precisión del pesaje, aumentando la posibilidad de errores humanos y reduciendo la estabilidad operativa del sistema.

Adicionalmente, las desviaciones en el pesaje provocan frecuentes paradas no programadas de la máquina ensacadora tipo Rotopacker, afectando la continuidad de la producción y reduciendo la disponibilidad operativa de la línea. Estas interrupciones generan tiempos muertos, disminución del rendimiento del equipo y retrasos en el cumplimiento de las metas de producción diarias.

1.2 Información de la empresa beneficiada

Cemento Chagres es una empresa panameña dedicada a la fabricación y distribución de cemento Portland y sus derivados. Sus instalaciones productivas se ubican en Pacora, provincia de Panamá, y abastecen tanto el mercado nacional como regional. La compañía opera líneas de molienda y ensacado que requieren altos estándares de control de proceso para garantizar la calidad del producto final y la eficiencia de la operación. El autor del presente trabajo se desempeña en dicha organización como Supervisor de Instrumentación y Control Industrial, lo que le permitió acceder a equipos, registros y personal involucrado en la problemática identificada.

1.3 Antecedentes de la situación problemática

Desde el inicio de las operaciones de la línea de ensacado con la tecnología actual, los supervisores y técnicos de planta han documentado variaciones de peso en los sacos terminados que oscilan entre ± 0.5 kg y ± 1.2 kg con respecto al valor nominal de 42.5 kg por saco. Estas variaciones se intensifican cuando el índice Blaine del cemento supera los límites de diseño establecidos para el sistema de llenado, situación que se presenta con una frecuencia estimada del 30 % de los turnos de producción. Los registros operativos internos indican que las paradas no programadas asociadas al rechazo de sacos fuera de especificación representan pérdidas de tiempo productivo de aproximadamente dos a cuatro horas por turno afectado. Adicionalmente, el desperdicio de cemento por sobrellenado o por sacos rechazados impacta directamente los costos variables de producción. La ausencia de un PLC con lógica adaptativa para ajustar en tiempo real el tiempo de apertura de válvula y el tiempo de corte de flujo fue identificada por el equipo técnico como una de las principales causas del problema.

La figura 1 muestra la ensacadora tipo Rotopacker en la línea de producción de Cemento Chagres.

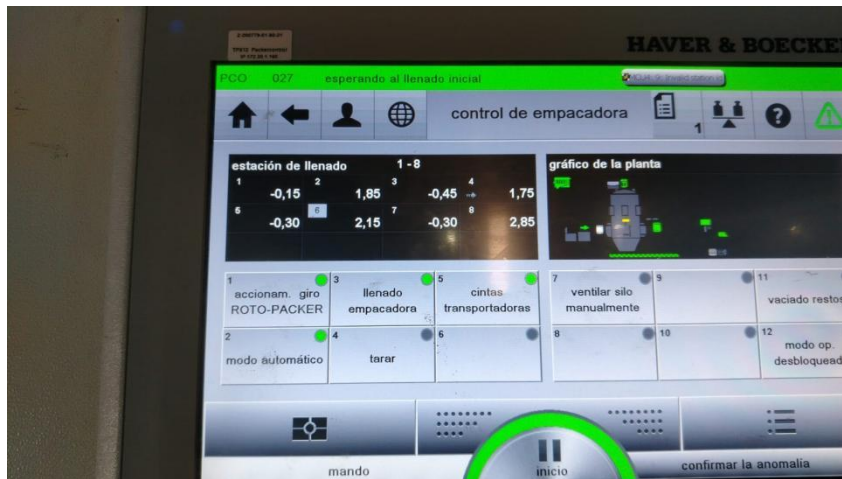
Figura 1: Vista general de la máquina



Nota: Elaboración propia, marzo 2026.

La figura 2 muestra la ensacadora Rotopacker, con parámetros de llenado fijos ajustados manualmente por el operador.

Figura 2: Panel de control actual de la ensacadora Rotopacker



Nota: Elaboración propia, marzo 2026.

La figura 3 muestra la especificación nominal de 42.5 kg, registrado durante la fase de diagnóstico.

Figura 3: Saco de cemento con peso fuera de la especificación nominal.



Nota: Elaboración propia, marzo 2026.

1.4 Formulación del Problema

Las preguntas de investigación que orientan el presente trabajo de grado son las siguientes:

- ¿En qué medida la implementación de un sistema de control automatizado con PLC reduce los errores de pesaje y las interrupciones no programadas en la línea de ensacado de Cemento Chagres?
- ¿Cuáles son las variables críticas del proceso de ensacado en particular, las variaciones de índice de Blaine que deben integrarse como entradas de control en la lógica del PLC para lograr el ajuste dinámico de los parámetros de llenado?
- ¿Qué configuración de hardware y software del PLC resulta técnicamente viable y compatible en la infraestructura de la planta para la implementación de sistema de control propuesto?

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Diseñar y validar una propuesta de sistema de control automatizado basado en un controlador lógico programable (PLC) para optimizar el proceso de ensacado de cemento en Cemento Chagres, reduciendo los errores de pesaje y las paradas no programadas mediante el ajuste dinámico de los parámetros de llenado según las variaciones del índice Blaine y los tiempos de rotación de la máquina.

1.5.2 Objetivos específicos

1. Diagnosticar el estado actual del proceso de ensacado mediante la recolección y análisis de datos operativos, registros de fallos y observación directa del sistema existente.
2. Identificar las variables críticas del proceso en especial la variabilidad del índice Blaine y los parámetros de pesaje que inciden en los errores de llenado y en las interrupciones operativas.
3. Diseñar la lógica de control en el PLC, incluyendo los algoritmos de ajuste automático de parámetros de llenado, conforme a los requerimientos técnicos del proceso y las buenas prácticas de automatización industrial.

4. Validar la propuesta de control automatizado con el personal técnico de Cemento Chagres mediante pruebas piloto o simulación, verificando la reducción de errores de pesaje y el incremento de la disponibilidad de la línea.

5. Estimar los indicadores de desempeño esperados tras la implementación definitiva del sistema PLC, considerando la reducción de errores de pesaje, paradas no programadas, desperdicio de material y mejora del OEE.

1.6 Justificación

La optimización del proceso de ensacado de cemento representa una necesidad operativa y económica para Cemento Chagres. Las pérdidas de material por errores de pesaje, sumadas a los tiempos muertos generados por paradas no programadas, afectan la rentabilidad de la empresa y su capacidad de cumplir con los estándares de calidad aplicables al sector cementero. En este sentido, el control de la finura mediante el índice de Blaine y el cumplimiento de requisitos de calidad del cemento son elementos técnicos vinculados a la conformidad del producto (ASTM International, 2023; Comisión Panameña de Normas Industriales y Técnicas [COPANIT], 1999).

Desde una perspectiva de ingeniería industrial, el diseño de un sistema de control automatizado con PLC constituye una solución técnicamente fundamentada y alineada con los principios de mejora continua, eficiencia operativa y reducción de variabilidad. La automatización programable permite ajustar instrucciones de control, responder a cambios de proceso y facilitar el diagnóstico de fallas en entornos industriales (Bolton, 2015; Groover, 2019). El proyecto integra conocimientos de automatización industrial, control de procesos, gestión de calidad y análisis de productividad.

A nivel social y económico, el proyecto contribuye al fortalecimiento de la competitividad de la industria panameña del cemento, sector estratégico para el desarrollo de infraestructura nacional. La reducción del desperdicio de material y el incremento de la disponibilidad de la línea de ensacado repercuten positivamente en los costos de producción y, potencialmente, en el precio final del producto para el consumidor. Asimismo, la mejora de las condiciones operativas beneficia directamente a los trabajadores de planta al reducir las interrupciones y la carga de trabajo asociada a la corrección manual de errores de pesaje.

La oportunidad de ejecutar este proyecto es particularmente favorable en el momento actual, dado que Cemento Chagres. se encuentra evaluando la modernización de sus sistemas de control, y como autor del proyecto ocupa una posición que le brinda acceso directo a los equipos, los datos operativos y el personal clave, lo que facilita la recolección de información y la validación técnica de la propuesta.

1.7 Alcance y delimitación del proyecto

El presente trabajo de investigación abarca el diseño y la validación de una propuesta de control automatizado con PLC para la línea de ensacado número 1 de Cemento Chagres, específicamente para la ensacadora tipo Rotopacker de 8 boquillas. El alcance se delimita de la siguiente manera:

- Alcance temático: la investigación se centra exclusivamente en el proceso de llenado y pesaje de sacos de cemento. No se incluye las etapas de paletizado, transporte neumático ni almacenamiento de producto terminado.
- Alcance geográfico: el proyecto se desarrolla en las instalaciones de Cemento Chagres, ubicadas en Pacora, provincia de Panamá.
- Alcance temporal: la investigación comprende el periodo de enero a junio de 2026 e incluye la fase de diagnóstico (enero-febrero), el diseño de la propuesta (marzo-abril) y la validación técnica (mayo-junio).
- Alcance de implementación: Se trata de una propuesta técnica con validación mediante prueba piloto controlada en condiciones reales de planta. La implementación definitiva a escala completa quedará sujeta a la aprobación de programación de parada de mantenimiento por parte de la gerencia de Cemento Chagres.
- Limitaciones: los datos operativos utilizados son de acceso interno y están sujetos a confidencialidad empresarial. Los resultados del proyecto se basan en la prueba piloto realizada y no constituyen garantía absoluta de desempeño bajo todas las condiciones de operación posibles.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Este capítulo desarrolla los fundamentos conceptuales y teóricos que sustentan la investigación. Se presentan los antecedentes de estudios previos relacionados con la automatización de procesos, las bases teóricas sobre controladores lógicos programables, índice de Blaine y sistemas de pesaje industrial, las bases legales aplicables en Panamá y glosario de términos técnicos esenciales.

2.1 Antecedentes de investigación

A continuación, se presentan investigaciones previas relacionadas con la automatización de procesos de ensacado y dosificación mediante PLC, así como estudios sobre el comportamiento del índice de Blaine en procesos de molienda y ensacado de cemento.

Antecedente 1

Villalobos y Mora (2022). Llevaron a cabo una investigación en Costa Rica titulada sistema de control PLC para la línea de envasado de material en polvo en la industria agroalimentaria, desarrollada en la Universidad de Costa Rica. El estudio se diseñó e implementó en un sistema de control basado en un PLC Siemens S7-1200 para la línea de envasado de harina, con énfasis en la reducción de la variabilidad del peso del producto final. Los investigadores implementaron un diseño experimental con medición antes y después de la implementación, obteniendo una reducción del error de pesaje del 79% y una mejora del 31% en la velocidad de producción este antecedente es relevante para la presente investigación porque documenta la aplicación del PLC en procesos de llenado de materiales pulverulentos con alta variabilidad, condición compartida por el cemento. La metodología de la validación mediante comparación de indicadores antes y después de la intervención fue adaptada para el presente estudio.

Antecedente 2

García, Restrepo y Suárez (2021) Publicaron en la revista ingeniería y competitividad de Colombia el artículo “optimización del proceso de dosificación en plantas cementeras mediante control adaptativo PLC-SCADA”. Los autores analizaron la integración de módulos de pesaje de

alta resolución con PLC y sistema SCADA en dos plantas cementeras colombianas, documentando mejora en la eficiencia operativa y en la exactitud del pesaje tras la eliminación de los controles basados en temporizadores fijos. Los resultados reportaron una reducción promedio del desperdicio del material del 18% y una disponibilidad de la línea superior al 92% en ambas plantas evaluadas. Este trabajo aporta evidencia directa sobre la viabilidad técnica de reemplazar el sistema de control fijo por la lógica adaptativa en el contexto específico del ensacado de cemento, validando el enfoque propuesto en este trabajo de grado.

Antecedente 3

Topaloğlu (2026) publicó en la revista Applied Sciences el artículo “Predicción de la figura del Blaine del producto final en la producción de cemento utilizando datos de control de calidad industrial basado en un insumo químico y granulométrico mediante aprendizaje automático”. La investigación desarrolló un modelo predictivo del índice de Blaine basado en las variables de proceso medibles en el tiempo real, demostrando que el índice de Blaine puede ser estimado con alta precisión a partir de datos operativos disponibles en planta. Este antecedente sustenta teóricamente la posibilidad de integrar el índice de Blaine como variable de entrada en la lógica de control del PLC propuesto, dado que su valor puede obtenerse en tiempo casi real a partir de los datos de laboratorio de calidad de Cemento Chagres.

Antecedente 4

Hernández y Pineda (2020) presentaron en el repositorio institucional de la Universidad Tecnológica de Panamá su trabajo de grado titulado “Propuesta de automatización de pesaje y llenado de sacos en una empresa procesadora de cal en Panamá”. La investigación propuso la sustitución de un sistema de control neumático manual por sistema PLC Allen Bradley Micro Logix 1100, documentando el proceso de selección de hardware, diseño de la lógica Ladder y estimación de los beneficios operativos. Los autores proyectaron una reducción del 65% en los errores del pesaje de una recuperación de la inversión en un periodo de 18 meses. Este antecedente es especialmente valioso porque sitúa el problema en el contexto panameño, en una industria de

materiales en polvo similar al cemento, y demuestra la viabilidad económica de este tipo de proyectos en el entorno local.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Automatización Industrial

La automatización industrial se define como la aplicación integrada de tecnología mecánica, eléctrica, electrónica e informática para controlar y supervisar procesos de producción con mínima intervención humana directa (Groover, 2019). De acuerdo con este enfoque, los sistemas automatizados pueden clasificarse en automatización fija, automatización programable y automatización flexible, siendo la automatización programable mediante PLC una alternativa adecuada para procesos de manufactura con variabilidad en las condiciones de operación.

En los contextos industriales contemporáneos, la automatización responde no solo a la necesidad de incrementar la productividad, sino también a la exigencia de garantizar estabilidad, repetibilidad y control de calidad en el proceso productivo. Cuando se acompaña de capacitación técnica, la adopción de tecnologías de automatización puede mejorar la competitividad industrial y fortalecer las capacidades del personal operativo (OIT, 2021).

2.2.2 Controlador Lógico Programable (PLC)

El controlador lógico programable (PLC, por sus siglas en inglés Programmable Logic Controller) es un dispositivo electrónico diseñado para controlar procesos industriales mediante la ejecución de programas almacenados en memoria. A diferencia de los sistemas basados en relés electromecánicos, el PLC ofrece flexibilidad de programación, confiabilidad operativa, facilidad de diagnóstico y capacidad de comunicación con otros dispositivos de control (Bolton, 2015).

Los componentes fundamentales de un PLC son la unidad central de procesamiento (CPU), la memoria de programación y datos, los módulos de entrada y salida (I/O) digitales y analógicas, la fuente de alimentación y la interfaz de comunicación. La CPU ejecuta el programa de control de manera cíclica mediante el scan cycle, el cual comprende la lectura de entradas, la ejecución de

la lógica de control y la escritura de salidas (Bolton, 2015). La norma IEC 61131-3 establece los lenguajes de programación normalizados para PLC, entre ellos Ladder Diagram (LD), Function Block Diagram (FBD) y Structured Text (ST) (IEC, 2025).

Para la presente investigación se propone el uso del PLC Siemens S7-1200, específicamente la CPU 1214C DC/DC/DC, equipada con entradas y salidas integradas y capacidad de expansión mediante módulos adicionales. Esta elección se fundamenta en la compatibilidad con el ecosistema Siemens existente en la planta, la disponibilidad de soporte técnico local y la robustez del entorno de programación TIA Portal (Siemens AG, 2025).

2.2.3 Índice Blaine y su Efecto en el Proceso de Ensacado

El índice de Blaine es una medida de la superficie específica del cemento, expresada en cm^2/g o m^2/kg , que cuantifica el grado de finura de las partículas de cemento molido. El método se determina mediante el aparato de permeabilidad al aire de Blaine, midiendo el paso de aire a través de una muestra compactada bajo condiciones estandarizadas (ASTM International, 2023). Un valor más alto del índice Blaine indica partículas más finas y, en consecuencia, mayor superficie específica.

Desde la perspectiva del proceso de ensacado, las variaciones del índice Blaine tienen un efecto directo sobre el comportamiento reológico del cemento durante el llenado de los sacos. Cuando el índice aumenta, la cohesividad del material también puede incrementarse y modificar el caudal másico de llenado. Si los parámetros de apertura y corte de válvula no se ajustan, se generan desviaciones de peso. Estudios recientes han demostrado que el índice Blaine puede modelarse a partir de datos industriales de calidad, lo que respalda su incorporación como variable de control del proceso (Topaloğlu et al., 2026).

El cemento Portland Tipo I producido por Cemento Chagres tiene un índice de Blaine nominal de diseño de $3,800 \text{ cm}^2/\text{g}$, con tolerancias de proceso que pueden generar valores entre $3,500$ y $4,200 \text{ cm}^2/\text{g}$ según los registros internos de laboratorio. Esta variabilidad, equivalente aproximadamente a $\pm 10.5 \%$ respecto al valor nominal, es suficiente para producir desviaciones de peso cuando el sistema de control opera con parámetros fijos.

2.2.4 Sistema de Pesaje Industrial

Los sistemas de pesaje industrial utilizados en líneas de ensacado se basan en celdas de carga, que son transductores electromecánicos capaces de convertir la fuerza aplicada por el peso del material en una señal eléctrica proporcional. En el ensacado tipo Rotopacker suelen emplearse celdas de carga de compresión, debido a que el saco recibe el material por gravedad durante el ciclo de llenado (Weightman, 2020).

La señal de la celda de carga es procesada por un transmisor o módulo de pesaje, el cual amplifica la señal, la convierte a unidades de masa y la transmite al sistema de control mediante señal analógica o protocolo digital. Para el sistema propuesto se contempla la integración del módulo Siemens SIWAREX WP231 conectado por PROFINET al PLC S7-1200, lo que permite leer el peso en tiempo real durante el ciclo de llenado (Siemens AG, 2015).

2.2.5 Máquina Ensacadora Tipo Rotopacker

La ensacadora Rotopacker es una máquina rotatoria de alto rendimiento diseñada para el llenado de sacos de papel o polipropileno con materiales polvorientos como cemento, cal, yeso y similares. Su principio de operación consiste en un carrusel giratorio con múltiples bocas de llenado, generalmente entre 6 a 16 en la que los sacos se insertan de forma manual o automática, se llenan con el material a través de una tobera provista de una válvula de mariposa de control neumático, se pesan mediante celdas de carga y se expulsan automáticamente al alcanzar el peso de corte programado (Haver & Boecker, 2020).

El parámetro de control más crítico en la ensacadora Rotopacker es el denominado “peso de corte” o cutoff weight, que es el valor de peso con el que el sistema ordena el cierre de la válvula de mariposa. Dado que el flujo de material continúa brevemente tras la orden de cierre de la válvula (efecto de Postllenado o after Flow), el peso de corte debe ser menor al peso nominal del saco. La diferencia entre el peso de corte y el peso nominal, denominado anticipación o dribble weight, debe ajustarse dinámicamente en función de la velocidad de flujo del material, que a su vez depende del índice de Blaine.

2.2.6 Control PID en procesos de pesaje

El control proporcional integral derivado (PID) es el algoritmo de control más utilizado en la industria para regular variables de proceso continuo. En la formulación discreta para implementación en PLC, el algoritmo calcula la señal de salida $u(k)$ en función de un error actual $e(k)$, la integral de error acumulado y la derivada del error, ponderadas por las constantes proporcional (k_p), integral (k_i) respectivamente (Ogata, 2010).

En el contexto del presente proyecto, el algoritmo PID se implementa en la lógica del PLC para regular el tiempo de anticipación del cierre de la válvula de mariposa. La variable controlada es el error de peso (diferencia entre el peso real del saco y el peso nominal de 42.5 kg, y la variable manipulada es el tiempo de anticipación expresada en milisegundos. El ciclo de autoajuste del PID analiza el error acumulado en los últimos segundos del ciclo de llenado y corrige el parámetro de anticipación para el ciclo siguiente, implementando así el comportamiento adaptativo que compensa las variaciones del índice Blaine.

2.2.7 Sistema SCADA e Interfaz HMI

Los sistemas de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA por sus siglas en inglés (Supervisory and Control Data Acquisition) permite la supervisión en tiempo real y el control remoto de procesos industriales distribuidos, integrando múltiples PLC, sensores y actuadores de una plataforma unificada de monitoreo (Lamb, 2018). La interfaz hombre-máquina (HMI, Human-Machine Interfaz) Es el componente de visualización del sistema SCADA que permite al operador observar el estado del proceso modificar parámetros de operación y acceder al historial de eventos de alarma.

Para el sistema propuesto se complementa la implementación de una pantalla HMI táctil Siemens KTP700 Basic de 7 pulgadas. Programada en TIA Portal, que muestre en tiempo real el peso actual de cada boca de la ensacadora, el valor del índice de Blaine ingresado por el laboratorio, el estado de las válvulas, el contador de sacos producidos por turno y las alarmas activas del sistema.

2.2.8 Indicadores de Eficiencia Operativa (OEE)

La efectividad global del equipo (OEE, Overall Equipment Effectiveness) Es un indicador compuesto que mide el porcentaje del tiempo planificado de producción durante el cual un equipo está realmente productivo y produciendo producto conforme. Se calcula como el producto de 3 factores: disponibilidad (Proporción del tiempo en el que el equipo está operativo), rendimiento (velocidad real que de producción respecto a la velocidad nominal) y calidad (proporción de producto conforme producido) (Nakajima, 1988, como se citó en Wireman, 2020).

El contexto de la presente investigación, el OEE de la línea de ensacado de Cemento Chagres se ve afectado negativamente por los 3 factores la disponibilidad disminuye por las paradas no programadas, el rendimiento se reduce por los ciclos de ajustes manuales y la calidad se ve impactada por los sacos rechazados por peso fuera de especificación. La implementación del sistema PLC adaptativo busca mejorar simultáneamente los tres componentes del OEE.

2.3 Bases legales

El presente proyecto de investigación se enmarca en disposiciones legales y normativas técnicas vigentes en Panamá y a nivel internacional. Estas normas se relacionan con metrología, calidad del cemento, seguridad durante intervenciones de instalación y mantenimiento, lenguajes de programación para PLC y métodos de ensayo del índice Blaine.

2.3.1 Ley No. 59 de 29 de julio de 1999

La Ley 59 de 1999 de la República de Panamá establece normas generales sobre normalización técnica, acreditación y metrología legal. Para este proyecto resulta pertinente porque el sistema de pesaje integrado en la línea de ensacado debe mantener trazabilidad, precisión y confiabilidad en la medición del peso nominal del producto comercializado.

2.3.2 Norma Técnica Panameña COPANIT 47-1999

La norma COPANIT 47-1999 establece requisitos de calidad para el cemento Portland producido y comercializado en Panamá, adoptando criterios técnicos asociados a normas ASTM. Esta norma es pertinente porque la conformidad del producto requiere controlar propiedades del

cemento, entre ellas la finura, que se relaciona directamente con el índice Blaine utilizado como variable de entrada del sistema propuesto (COPANIT, 1999).

2.3.3 Norma IEC 61131-3

La norma internacional IEC 61131-3 establece la sintaxis y semántica de los lenguajes de programación para controladores programables. La lógica de control diseñada en el presente proyecto se desarrolla en Ladder Diagram, lenguaje reconocido por esta norma y ampliamente utilizado en aplicaciones industriales (IEC, 2025).

2.3.4 Norma ASTM C204-23

La norma ASTM C204-23 (Standard Test Methods for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus) Establece el procedimiento estándar para la determinación del índice de Blaine mediante el aparato de permeabilidad del Blaine. Esta norma es la referencia técnica internacional para la medición del parámetro que constituye la variable de entrada principal del sistema de control adaptativo propuesto. Cemento Chagres aplica esta norma en su laboratorio de calidad para la medición del Blaine de cada lote de producción (ASTM International, 2023).

2.3.5 Decreto Ejecutivo No. 306 de 2002 - Control de ruido en ambientes laborales

El Decreto Ejecutivo No. 306 de 2002 adopta el reglamento para el control de ruidos en espacios públicos, áreas residenciales y ambientes laborales. Aunque no regula específicamente la programación de PLC, es relevante para la operación industrial porque las líneas de ensacado y sus sistemas neumáticos y mecánicos pueden generar exposición a ruido, por lo que las intervenciones de mejora deben considerar condiciones seguras de trabajo y control de fuentes sonoras.

2.4 Términos Básicos

A continuación, se definen los términos técnicos fundamentales del presente trabajo de investigación ordenados alfabéticamente:

Actuador: Dispositivo que convierte una señal de control en acción física sobre un proceso. En el sistema de ensacado, los actuadores principales son las válvulas de mariposa neumática (Bolton, 2015).

Automatización: Aplicación de tecnología para ejecutar procesos industriales con mínima intervención humana (Groover, 2019).

Celda de carga: Transductor que convierte la fuerza mecánica del proceso en una señal eléctrica proporcional (Weightman, 2020).

Ciclo de escaneo: Ciclo de ejecución repetitivo del PLC que comprende la lectura de entradas, la ejecución del programa y la actualización de las salidas (Bolton, 2015).

CPU (Unidad Central de Procesamiento): Componente principal del PLC que ejecuta el programa de control y gestiona la comunicación entre los módulos del sistema (Bolton, 2015).

Diagrama de escalera (Ladder Diagram): Lenguaje de programación gráfica para PLC basado en la representación simbólica de circuitos de relés, normalizado por IEC 61131-3.

Ensacadora Rotopacker: Máquina rotativa de alto rendimiento para el llenado de sacos en materiales pulverulentos, que opera mediante un carrusel de bocas de llenado (Haver & Boecker, 2020).

HMI: Interfaz hombre-máquina. Pantalla o sistema de visualización que permite al operador interactuar con el sistema de control de proceso (Lamb, 2018).

Índice de Blaine: Medida de la superficie específica del cemento en cm^2/g , determinada por el método de permeabilidad al aire de Blaine (ASTM International, 2023).

I/O: Entradas y salidas del PLC. Las entradas reciben señales de sensores y las salidas envían señales a actuadores (Bolton, 2015).

Lógica adaptativa: Sistema de control capaz de ajustar sus parámetros de manera automática en función de las condiciones variables del proceso.

Módulo de pesaje: Módulo electrónico especializado que procesa la señal de la celda de carga y entrega al PLC el valor del peso con alta resolución y precisión.

OEE: Efectividad global del equipo (Overall Equipment Effectiveness). Indicador compuesto de disponibilidad, rendimiento y calidad de un equipo productivo (Wireman, 2020).

PID: Control proporcional integral derivativo. Algoritmo de control que ajusta la variable manipulada en función del error actual, acumulado y su tasa de cambio (Ogata, 2010).

PLC: Controlador lógico programable (Programmable Logic Controller). Dispositivo electrónico de estado sólido diseñado para controlar procesos industriales mediante programas almacenados (Bolton, 2015).

Postllenado: Cantidad de material que continúa ingresando al saco tras la orden de cierre de la válvula, debido a la inercia del flujo. Debe compensarse mediante el peso de anticipación (Haver & Boecker, 2020).

PROFINET: Protocolo de comunicación basado en Ethernet, utilizado para la comunicación en tiempo real entre PLC, módulos de E/S y dispositivos de campo.

SCADA: Sistema de supervisión, control y adquisición de datos. Plataforma de software para el monitoreo y control remoto de procesos industriales distribuidos (Lamb, 2018).

Setpoint: Valor deseado o referencia de una variable del proceso que el sistema de control debe mantener.

Subllenado: Condición en la que el saco recibe menos que el peso nominal especificado, generando incumplimiento de la especificación del producto.

Tolva: Recipiente de forma cónica o piramidal utilizado para almacenar y dosificar material granulado o pulverulento en procesos industriales.

Transductor: Dispositivo que convierte una magnitud física (peso, temperatura o posición) en una señal eléctrica procesable por el sistema de control.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

En este capítulo se describe el diseño metodológico empleado para el desarrollo de la investigación. Se detalla el tipo y diseño del estudio, la población y muestra seleccionada, las técnicas e instrumentos de recolección de datos utilizados y el procedimiento seguido de cada fase del proyecto, desde el diagnóstico inicial hasta la validación de la propuesta.

3.1 Tipo y diseño de investigación

El presente trabajo de grado se enmarca en una investigación aplicada, con enfoque mixto y diseño de campo de tipo cuasiexperimental preprueba/posprueba. Se considera aplicada porque su propósito principal es resolver un problema concreto identificado en el entorno productivo de Cemento Chagres mediante una propuesta tecnológica. Según Hernández-Sampieri, Fernández-Collado y Baptista-Lucio (2014), la investigación aplicada se orienta a la solución de problemas prácticos y a la generación de respuestas útiles para contextos reales.

El enfoque cuantitativo permite medir de forma objetiva las variables del proceso, tales como peso de los sacos, tasa de rechazo, tiempo de parada e índice de Blaine. El componente cualitativo permite comprender factores operativos, organizacionales y técnicos que condicionan el desempeño actual del sistema de ensacado.

El diseño cuasiexperimental preprueba/posprueba se justifica porque se evalúan los indicadores del proceso antes de la validación del sistema PLC (línea base) y después de la prueba piloto, sin grupo de control externo. Esta decisión responde a que la investigación se desarrolla sobre una línea de producción real en operación continua, donde no resulta viable detener completamente el proceso o crear una línea paralela de control.

3.2 Población y Muestra

La población de estudio está formada por dos componentes: el personal técnico y operativo vinculado a la línea de ensacado, y los registros cuantitativos de producción y calidad.

En cuanto al personal, la población abarca aproximadamente 15 personas entre operadores de ensacadora, técnicos de mantenimiento eléctrico e instrumentación y supervisores de turno. Dado que se trata de un caso único de estudio y de una población reducida, se aplica un muestreo intencional por criterio, seleccionando participantes con experiencia directa en la operación y mantenimiento del sistema de ensacado. Se realizaron entrevistas a 9 personas: 4 operadores, 3 técnicos de mantenimiento eléctrico/instrumentación y 2 supervisores de turno.

En cuanto a los datos cuantitativos, se tomaron como base los registros de producción de tres meses (enero, febrero y marzo de 2026), que comprenden 63 turnos de producción. Para el análisis del peso de los sacos, se seleccionó una muestra aleatoria sistemática de 100 sacos por turno durante 15 turnos representativos, obteniéndose 1,500 mediciones de peso para la línea base de diagnóstico.

Por tratarse de información operativa interna, los datos fueron tratados de forma agregada y con fines académicos. No se divulgaron registros sensibles, nombres de trabajadores ni información estratégica de la empresa, respetando la confidencialidad empresarial durante el análisis y la presentación de resultados.

3.3 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

3.3.1 Técnicas

- Observación participante estructurada: el investigador, en su rol de Supervisor de Instrumentación y Control, realizó registros sistemáticos del proceso de ensacado durante turnos de producción representativos, documentando ciclos de llenado, alarmas generadas por la ensacadora y ajustes manuales efectuados por los operadores.
- Entrevista semiestructurada: aplicada a operadores, técnicos de mantenimiento y supervisores de turno, con el propósito de recopilar información experiencial sobre las causas, frecuencia e impacto de los errores de pesaje y las paradas no programadas.
- Análisis documental: revisión de los registros históricos de producción, reportes de mantenimiento, hojas de control de calidad y especificaciones técnicas de

la ensacadora, para cuantificar la magnitud del problema durante el periodo de referencia.

3.3.2 Instrumentos

- Guía de observación estructurada: lista de verificación con variables de proceso predefinidas (peso por saco, tiempo de ciclo, número de alarma e índice de Blaine registrado), completada durante cada turno de observación, (Asamblea Nacional de Panamá, 1999)
- Guía de entrevistas semiestructuradas: instrumento con 12 preguntas abiertas y de escala orientadas a explorar la percepción del personal técnico sobre las causas del problema, la frecuencia de incidencia y las soluciones previamente aplicadas.
- Ficha de análisis documental: formato estandarizado para la extracción y sistematización de datos de los registros históricos de producción y calidad.

3.4 Cuadro de Operacionalización de Variables

La tabla 1 presenta el cuadro de la operacionalización de las variables de estudio:

Tabla 1 Variables de estudio.

Variable	Dimensión	Indicador	Unidad	Instrumento
Error de pesaje	Precisión del proceso	Desviación estándar del peso	kg	Báscula de verificación
Índice Blaine	Calidad del material	Superficie específica del cemento	cm ² /g	Reporte lab. calidad
Paradas no programadas	Disponibilidad del equipo	Horas de parada / turno	h/turno	Registro de producción
Tasa de rechazo	Calidad del producto	Sacos rechazados / total producido	%	Registro de calidad
Velocidad de producción	Rendimiento	Sacos producidos / hora	sacos/h	Contador de la ensacadora

Nota. Elaboración propia.

3.5 Procedimiento

El desarrollo del proyecto se realizó en 5 fases consecutivas, descritas a continuación:

Fase 1

Diagnóstico de Proceso Actual (enero-febrero 2026)

Se realizó el levantamiento completo del estado actual de la línea de ensacado mediante observaciones directas durante 15 turnos de producción, registro de 1,500 mediciones de peso, análisis de registros de paradas y mantenimiento de los tres meses previos, y entrevistas al personal técnico y operativo. Esta fase permitió cuantificar la magnitud del problema y establecer la línea base de indicadores.

Fase 2

Identificación de Variables Críticas (febrero 2026)

Con base en los datos de diagnóstico, se realizó el análisis de causa raíz utilizando el diagrama de Ishikawa y el análisis de correlación entre el índice de Blaine y el error de pesaje de los sacos. Esta fase permitió confirmar el índice de Blaine como la variable de entrada principal del sistema de control y definir los rangos de ajuste requeridos para la lógica adaptativa.

Fase 3

Diseño de la Lógica de Control (marzo – abril 2026)

Se diseñó la arquitectura del sistema de control, se seleccionó el hardware (PLC, módulo de pesaje, HMI y cableado) y se programó la lógica de control en lenguaje Ladder utilizando TIA Portal V17. La lógica incluye la rutina principal de ciclo de llenado, la subrutina de ajuste adaptativo por índice Blaine, la rutina de gestión de alarmas y la programación de la pantalla HMI, conforme a las buenas prácticas de programación para controladores industriales (Bolton, 2015; IEC, 2025).

Fase 4

Validación Mediante Prueba Piloto (mayo-junio 2026)

Se realizó la prueba piloto del sistema en condiciones reales de operación durante 5 turnos de producción, con monitoreo continuo de los indicadores de desempeño. Se compararon los resultados con la línea base del diagnóstico para evaluar la efectividad del sistema propuesto.

Fase 5

Análisis final y redacción del informe técnico (junio 2026)

Se documentaron los resultados obtenidos, se elaboraron las conclusiones y recomendaciones y se redactó el presente informe técnico final para su presentación ante el Comité de Titulación.

La figura 4 muestra Observación directa del proceso de ensacado durante la fase de diagnóstico de campo.

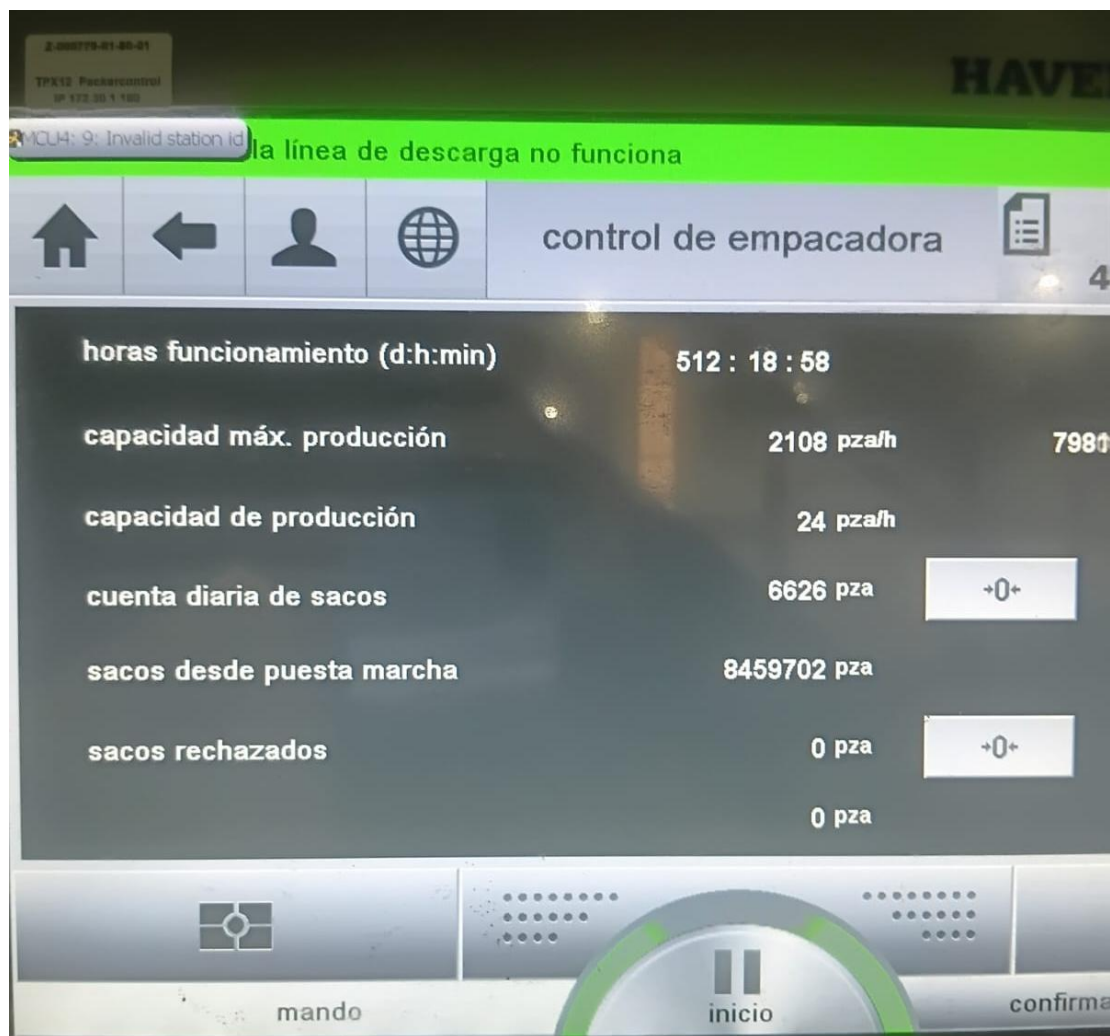
Figura 4: Observación directa del proceso de ensacado.



Nota: Elaboración propia, marzo 2026.

La figura 5 muestra Registro de datos de producción y control de calidad correspondientes al turno observado.

Figura 5: Registro de datos de producción.



Nota: Elaboración propia, marzo 2026.

CAPÍTULO IV
RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este capítulo presenta los hallazgos obtenidos en cada fase de la investigación. se presentan los resultados del diagnóstico del proceso actual, la identificación de las variables críticas, el diseño de la lógica de control PLC y los resultados de la prueba piloto de validación, acompañados del análisis e interpretación correspondiente a cada indicador evaluado.

4.1 Diagnóstico del Proceso Actual de Ensacado

El diagnóstico del proceso de ensacado de Cemento Chagres permitió cuantificar la magnitud de la deficiencia operativa existente: el 18.3 % de los sacos producidos presenta un peso fuera de la especificación de ± 0.5 kg, la desviación estándar del peso es de ± 0.348 kg y las paradas no programadas asociadas al control de pesaje consumen aproximadamente 84.2 horas de tiempo productivo por trimestre. Estos datos establecen una línea base sólida que sustenta técnica y económicamente la necesidad de la intervención propuesta.

4.1.1 Análisis de la Variabilidad del Peso de los Sacos

El análisis de las 1,500 mediciones de peso de sacos tomadas durante 15 turnos de observación reveló los siguientes resultados estadísticos:

La tabla 2 muestra el análisis de 1500 mediciones de peso de sacos tomadas durante 15 turnos.

Tabla 2

Registro estadístico de variaciones de peso (muestra de 1,500 sacos, enero-marzo 2026).

Estadístico	Valor
Peso nominal del saco	42.500 kg
Peso promedio medido	42.487 kg
Desviación estándar	± 0.348 kg
Rango (mínimo – máximo)	41.20 kg – 43.80 kg
Coefficiente de variación	0.82%
Sacos fuera de especificación (± 0.5 kg)	18.3% del total (275 sacos)
Sacos con subllenado (< 42.0 kg)	9.1% (136 sacos)
Sacos con sobrellenado (> 43.0 kg)	9.2% (138 sacos)

Nota: Elaboración propia a partir de registros de Cemento Chagres.

Estos resultados evidencian que la línea de ensacado opera con una variabilidad de peso superior a la tolerancia admisible de ± 0.5 kg establecida por la empresa. El 18.3 % de los sacos producidos se encuentra fuera de especificación, lo que representa una tasa de no conformidad que impacta directamente los costos de producción y la calidad del producto despachado.

La figura 6 muestra Lectura de peso fuera de rango en la báscula de la ensacadora durante el período de línea base.

Figura 6: Lectura de peso fuera de rango en la báscula.



Nota: Elaboración propia, marzo 2026.

4.1.2 Análisis de Paradas No Programadas

El análisis de los registros de producción de los tres meses de referencia identificó un total de 89 paradas no programadas asociadas al proceso de ensacado, con la distribución y características que se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3

Frecuencia y duración de paradas no programadas (enero-marzo 2026).

Causa de la parada	Frecuencia	Duración promedio (min)	% del tiempo de parada
Rechazo de sacos por peso fuera de rango	43	78	66.4%
Alarmas de peso cero / señal de celda perdida	21	45	18.7%
Ajuste manual de parámetros de llenado	18	32	11.4%
Otras causas	7	25	3.5%
TOTAL	89	5,050 min	100%

Nota: Elaboración propia a partir de registros de Cemento Chagres.

En la figura 7 muestra el desglose de 13 semanas de paradas por mes con total acumulado de 5050 min

Figura 7: Registro histórico de paradas no programadas de la línea de ensacado correspondiente al trimestre evaluado.

REGISTRO HISTÓRICO DE PARADAS NO PROGRAMADAS

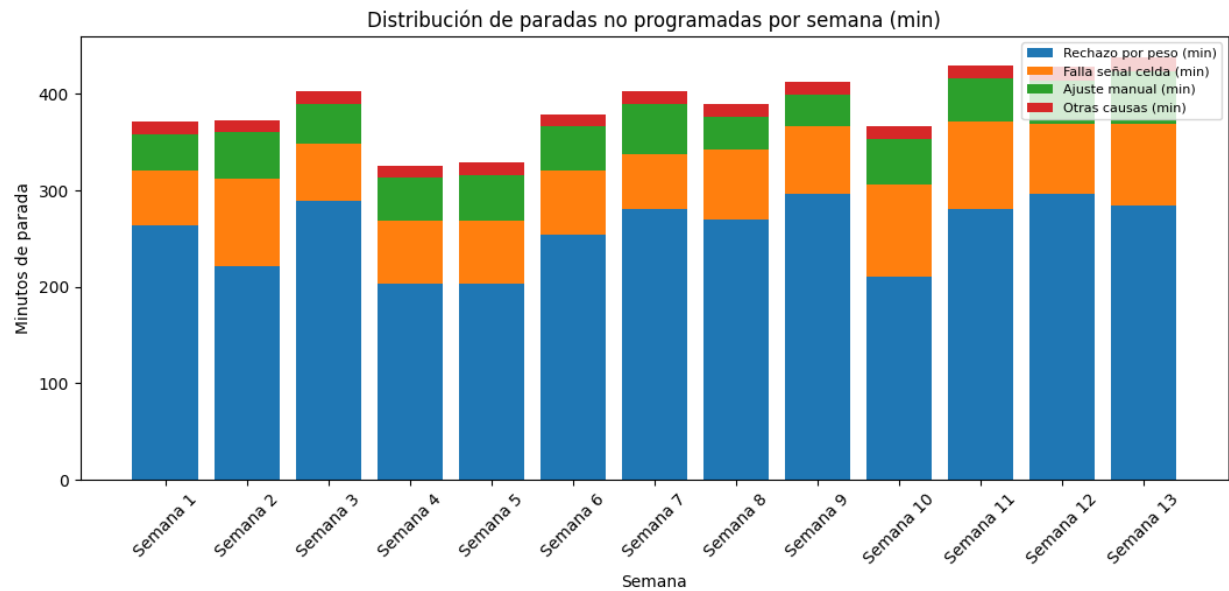
Línea de ensacado — Cemento Chagres. | Enero - Marzo 2026

Semana	Mes	Rechazo por peso (min)	Falla señal celda (min)	Ajuste manual (min)	Otras causas (min)	Total paradas (min)
Semana 1	Enero	264	57	37	13	371
Semana 2	Enero	222	90	48	13	373
Semana 3	Enero	289	59	42	13	403
Semana 4	Enero	203	66	44	13	326
Semana 5	Febrero	203	65	48	13	329
Semana 6	Febrero	254	66	46	13	379
Semana 7	Febrero	281	56	53	13	403
Semana 8	Febrero	270	72	34	14	390
Semana 9	Marzo	296	71	32	14	413
Semana 10	Marzo	210	96	47	14	367
Semana 11	Marzo	281	90	45	14	430
Semana 12	Marzo	297	72	45	14	428
Semana 13	Marzo	284	85	55	14	438
	TOTAL	3354	945	576	175	5050

Nota: Elaboración propia, enero-marzo 2026.

La figura 8 muestra los minutos de parada semanales acumulados por categoría

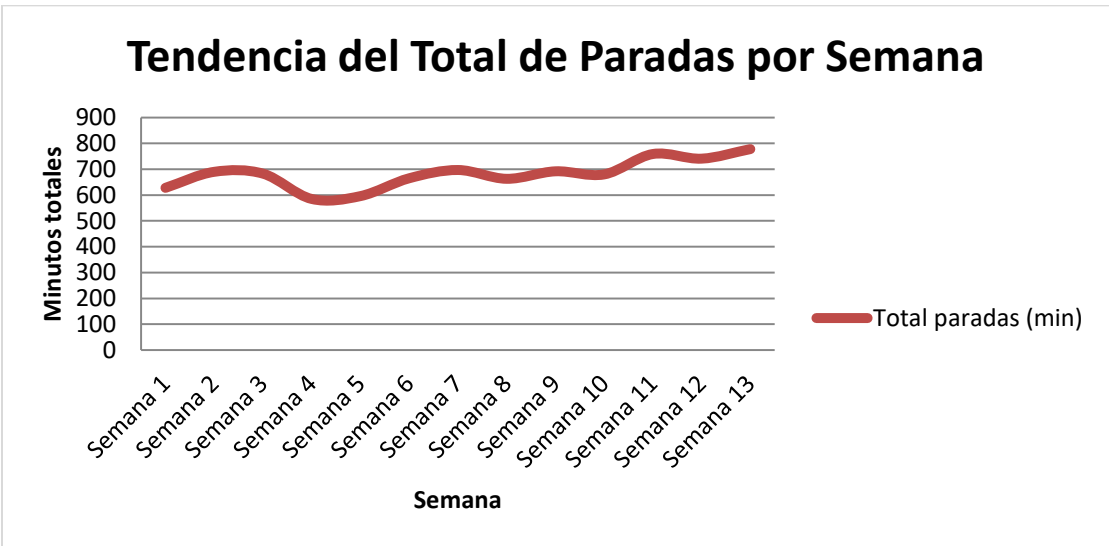
Figura 8:*Distribución de Paradas No Programadas por Semana (min).*



Nota: Elaboración propia, enero-marzo 2026.

La figura 9 muestra la evolución de tiempos muertos semanales

Figura 9:*Tendencia del Total de Paradas por Semana*



Nota: Elaboración propia, enero-marzo 2026.

El análisis de la Tabla 4 revela que el 77.8 % del tiempo de parada, considerando el rechazo de sacos por peso fuera de rango y los ajustes manuales de parámetros, se relaciona directamente con la falta de capacidad adaptativa del sistema de control actual. Estas paradas representan un total acumulado de aproximadamente 5,050 minutos (84.2 horas) de tiempo productivo perdido en el trimestre.

4.2 Identificación de Variables Críticas del Proceso

El análisis de causa raíz mediante el diagrama de Ishikawa identificó cuatro categorías principales de factores que contribuyen a los errores de pesaje: material (variaciones del índice de Blaine), método (parámetros fijos del sistema de control), equipo (desgaste de válvula de mariposa y calibración de celda de carga) y personal (ajustes manuales inconsistentes entre operadores).

El análisis de correlación estadística entre el índice de Blaine (variable independiente) y el error de peso de los sacos (variable dependiente) arrojó un coeficiente de correlación de Pearson $r = 0.847$ ($p < 0.001$), confirmando una correlación positiva fuerte y estadísticamente significativa entre ambas variables. Esto significa que el 71.7 % de la varianza del error de peso puede explicarse por las variaciones del índice de Blaine, validando este parámetro como variable de entrada principal para el sistema de control adaptativo.

La Tabla 4 resume las variables críticas del proceso y los instrumentos de medición asociados.

Tabla 4

Variables críticas del proceso de ensacado e instrumentación asociada.

Variable	Tipo	Rango operativo	Instrumento	Criticidad
Índice Blaine	Entrada (perturbación)	3,500–4,200 cm ² /g	Reporte laboratorio	Alta
Peso del saco en llenado	Variable controlada	42.0–43.0 kg	Celda de carga / módulo SIWAREX	Alta
Tiempo de apertura de válvula	Variable manipulada	8.0–12.0 s	Salida del PLC	Alta
Tiempo de anticipación (corte)	Variable manipulada	0.2–0.8 s	Salida del PLC	Alta

Variable	Tipo	Rango operativo	Instrumento	Criticidad
Velocidad de rotación del carrusel	Variable de proceso	2.5–3.5 rpm	Encoder	Media

Nota: Elaboración propia.

4.3 Diseño de la Lógica de Control PLC

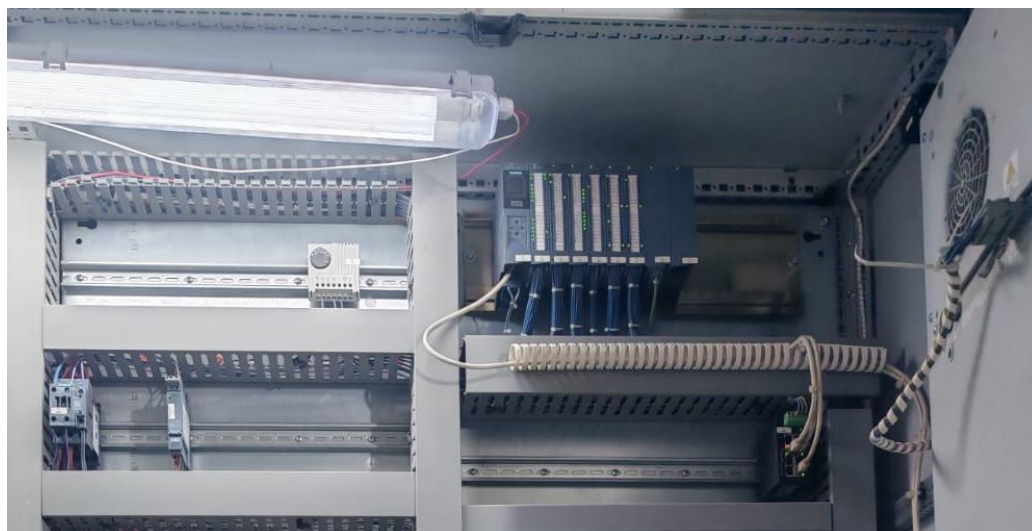
4.3.1 Selección del Hardware

Con base en los requisitos del proceso identificados en el diagnóstico, y considerando compatibilidad, disponibilidad de soporte y capacidad de comunicación industrial, se seleccionó el siguiente hardware para el sistema de control propuesto (Siemens AG, 2015; Siemens AG, 2025):

La tabla 5 muestra la selección de los componentes se fundamenta en las especificaciones técnicas y criterios de compatibilidad del fabricante Siems.

La figura 10 muestra el controlador seleccionado para la propuesta de automatización.

Figura 10:Controlador lógico programable Siemens S7-1200



Nota: Elaboración propia, abril 2026.

Tabla 5

Especificaciones técnicas del hardware del sistema de control PLC propuesto.

Componente	Modelo seleccionado	Justificación
PLC (CPU)	Siemens S7-1200, CPU 1214C DC/DC/DC	Compatible con infraestructura Siemens existente en planta; 14DI/10DO/2AI integradas
Módulo de pesaje	Siemens SIWAREX WP231	Resolución ± 0.01 kg; comunicación PROFINET nativa con S7-1200
Pantalla HMI	Siemens SIMATIC KTP700 Basic 7"	Pantalla táctil compatible con TIA Portal; visualización de 4 variables simultáneas
Fuente de alimentación	Siemens PM 1207, 24VDC / 2.5A	Tensión de trabajo 24 VDC requerida por CPU y módulos
Switch industrial Ethernet	Siemens SCALANCE XB005	Comunicación PROFINET entre PLC, módulo SIWAREX y HMI

Nota: Elaboración propia.

4.3.2 Arquitectura del Sistema de Control

La arquitectura del sistema de control propuesto integra el PLC Siemens S7-1200 como unidad central de procesamiento, conectado mediante PROFINET con el módulo de pesaje SIWAREX WP231 y la pantalla HMI KTP700. El módulo SIWAREX recibe la señal de la celda de carga existente en la ensacadora y entrega al PLC el valor de peso en tiempo real. El PLC ejecuta el programa de control y genera las señales de salida para la válvula de mariposa neumática de cada boca de llenado.

El laboratorio de calidad ingresa el valor del índice Blaine de cada lote mediante la pantalla HMI al inicio de cada turno de producción. Con ese valor, el PLC selecciona automáticamente el rango de ajuste correspondiente a la Tabla 7 y activa la subrutina de control adaptativo para ese turno.

4.3.3 Listado de Entradas y Salidas (I/O)

La Tabla 6 presenta el listado completo de entradas y salidas del sistema de control PLC:

Tabla 6

Listado de entradas y salidas del sistema de control PLC.

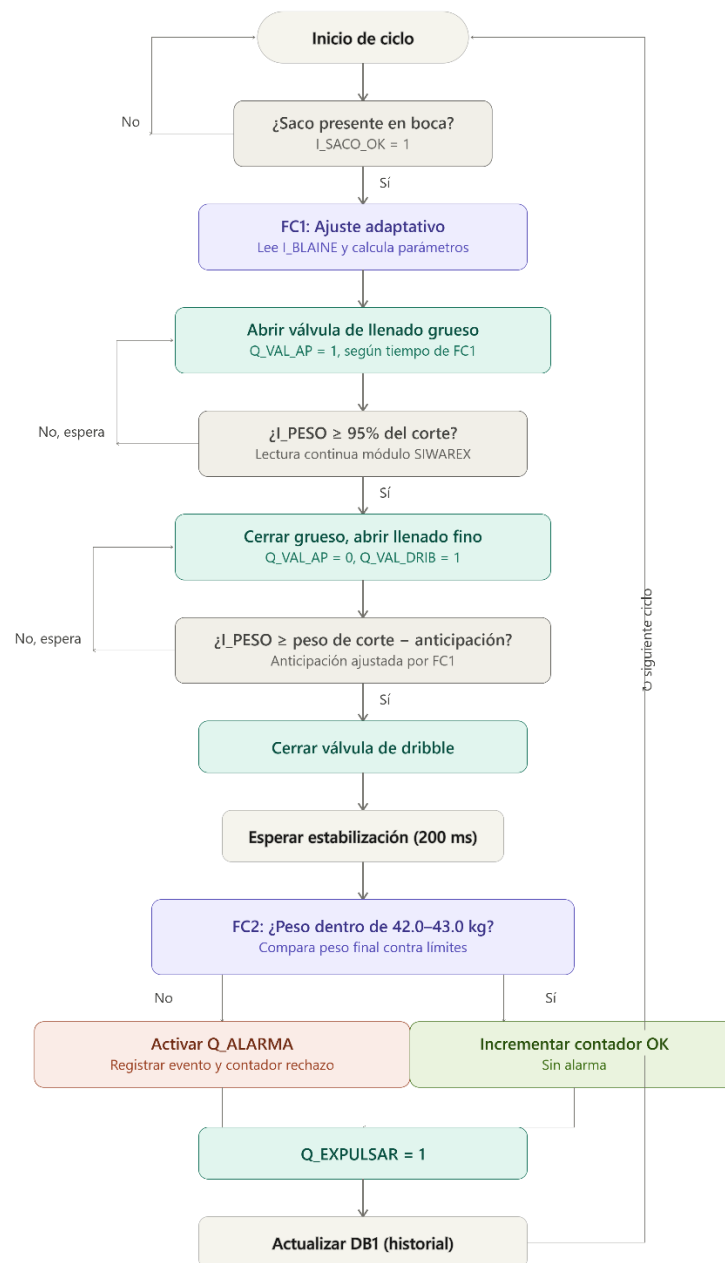
Tag	Descripción	Tipo	Dirección PLC	Rango / Estado
I_PESO	Peso actual del saco en llenado	Entrada analógica (PROFINET SIWAREX)	DB_SIWAREX.Peso	0–60 kg / ± 0.01 kg
I_START	Señal de inicio de ciclo de llenado	Entrada digital	I0.0	0 / 1
I_SACO_OK	Sensor de presencia de saco en boca	Entrada digital	I0.1	0 / 1
I_BLAINE	Valor índice Blaine ingresado por operador (HMI)	Variable de memoria (HMI)	MW100	2000–5000 cm^2/g
Q_VAL_AP	Apertura de válvula de mariposa (llenado grueso)	Salida digital	Q0.0	0 / 1

Tag	Descripción	Tipo	Dirección PLC	Rango / Estado
Q_VAL_DRIB	Apertura de válvula de dribble (llenado fino)	Salida digital	Q0.1	0 / 1
Q_EXPULSAR	Señal de expulsión del saco lleno	Salida digital	Q0.2	0 / 1
Q_ALARMA	Alarma de saco fuera de especificación	Salida digital	Q0.3	0 / 1

Nota: Elaboración propia.

Esta figura 11 muestra los bloques lógicos secuenciales desde detección hasta expulsión.

Figura 11:Diagrama de flujo de la lógica aplicada



Nota: Elaboración propia

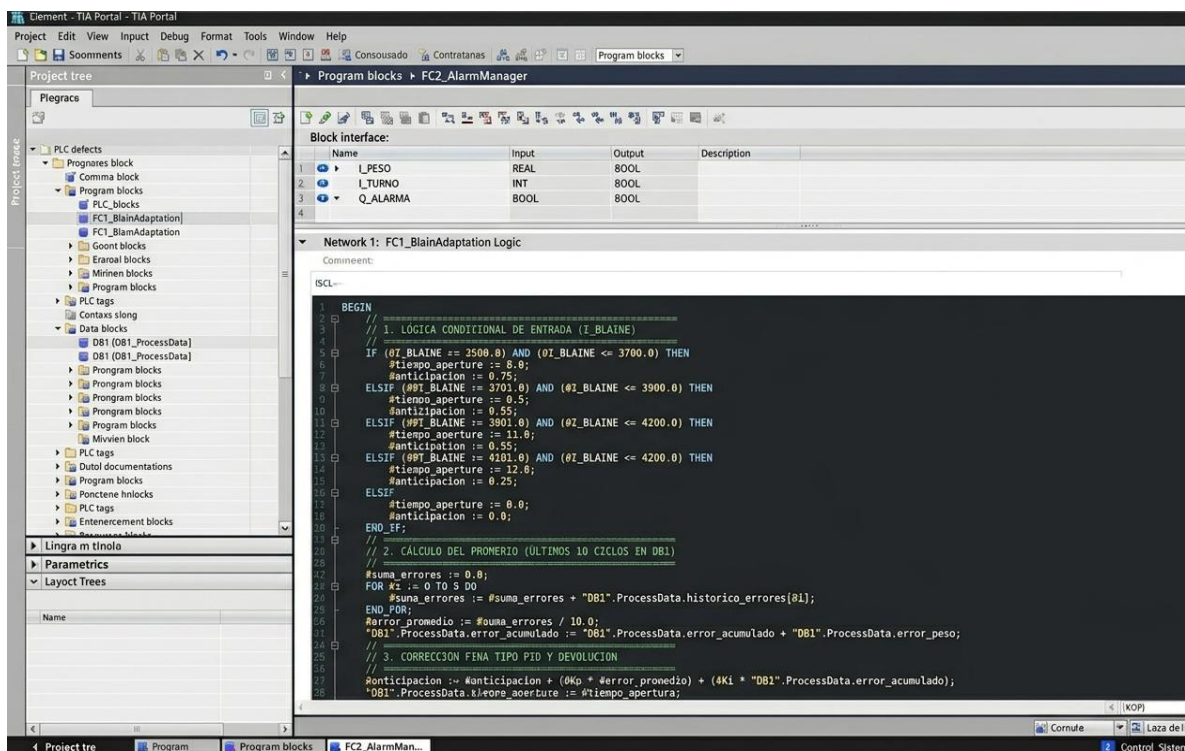
4.3.4 Lógica de Control- Descripción del Programa Ladder

El programa de control desarrollado en TIA Portal V17 en lenguaje Ladder Diagram está organizado en las siguientes rutinas:

- Rutina Principal (OB1 Main): Gestiona el ciclo completo de llenado de la ensacadora, desde la detección del saco vacío hasta la expulsión del saco lleno. Controla la secuencia de apertura y cierre de la válvula de llenado grueso y dribble en función del peso medido por el módulo SIWAREX.

La fura 12 muestra el bloque Rutina Principal (OB1 Main) del programa desarrollado en TIA Portal.

Figura 12: Rutina principal OB1 del PLC.



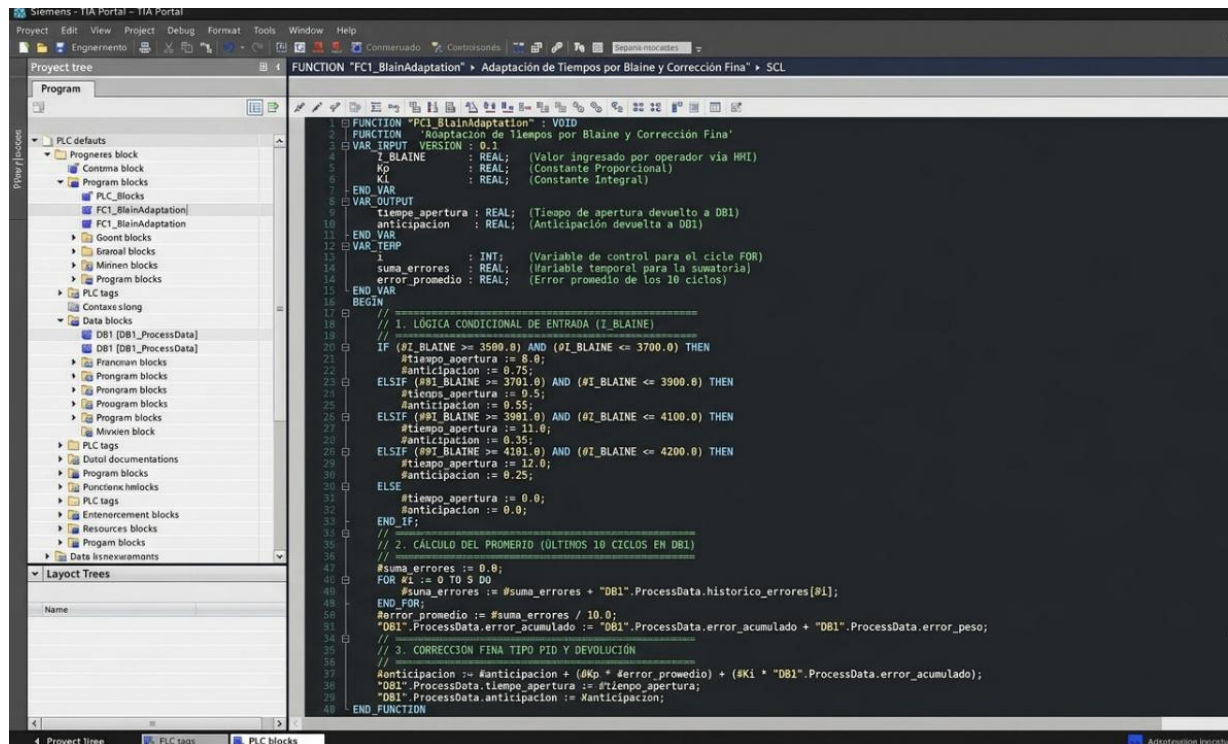
Nota: Elaboración propia

- Subrutina de ajuste adaptativo (FC1 Blaine Adaptation): calcula el tiempo de anticipación de corte de la válvula para el siguiente ciclo, en función del índice

de Blaine ingresado y del error promedio de peso de los últimos 10 ciclos. Implementa el algoritmo PID discreto para la corrección del parámetro de anticipación.

La figura 13 presenta la subrutina FC1 Blaine Adaptación, encargada de calcular el tiempo de anticipación para el cierre de la válvula de llenado en el siguiente ciclo.

Figura 13: Subrutina de ajuste adaptativo por índice Blaine.

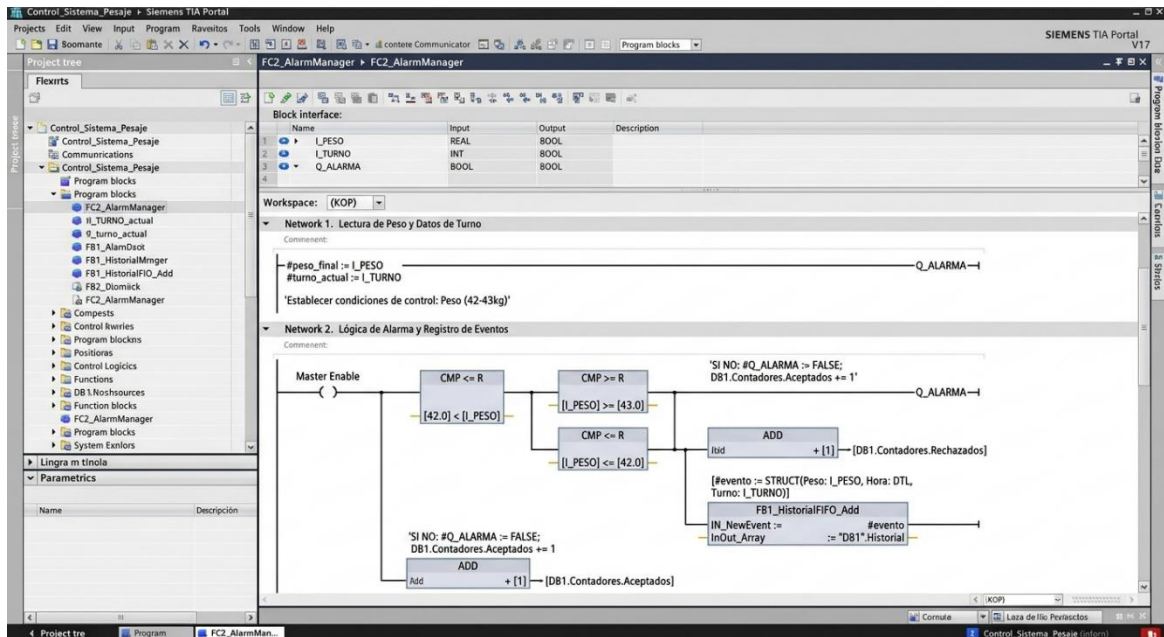


Nota: Elaboración propia

- Subrutina de gestión de alarmas (FC2 AlarmManager): monitorea continuamente el peso de cada saco al finalizar el ciclo de llenado y genera alarma en la HMI cuando el peso cae fuera del rango de aceptación (42.0-43.0 kg). Además, contabiliza los sacos rechazados y registra el evento con marca de tiempo.

La Figura 14 muestra la subrutina FC2 AlarmManager, responsable de monitorear el peso final de los sacos, generar alarmas cuando el peso se encuentra fuera del rango de aceptación,

- *Figura 14: Subrutina de alarmas y control de peso.*



- *Nota:* Elaboración propia

- Bloque de datos global (DB1 ProcessData): almacena los parámetros de proceso configurables (setpoint de peso, rango de Blaine y parámetros PID), el historial de los últimos 100 ciclos de llenado y los contadores de turno.

4.3.5 Parámetros de Llenado Ajustados por Rango de Índice de Blaine

Con base en los datos del diagnóstico y las pruebas de caracterización del proceso, se establecieron los parámetros de llenado para cada rango del índice de Blaine.

En la tabla 7 muestra los parámetros de llenado se definieron de acuerdo con el comportamiento y condiciones del proceso.

Tabla 7

Parámetros de llenado ajustados por rango de índice de Blaine

Rango Blaine (cm ² /g)	Comportamiento del flujo	Tiempo apertura válvula (s)	Anticipación de corte (s)	Peso de corte (kg)
3,500 – 3,700	Flujo rápido	8.0	0.75	41.75
3,701 – 3,900	Flujo nominal	9.5	0.55	41.95
3,901 – 4,100	Flujo lento	11.0	0.35	42.15
4,101 – 4,200	Flujo muy lento	12.0	0.25	42.25

Nota: Elaboración propia a partir de pruebas de caracterización del proceso.

La validación del sistema de control propuesto se realizó mediante una prueba piloto de cinco turnos de producción (10 horas por turno), ejecutada entre el 19 y el 23 de mayo de 2026. Durante la prueba, el sistema PLC propuesto operó en paralelo con el sistema existente, permitiendo la comparación directa de resultados bajo condiciones similares de proceso. Se monitorearon y registraron 1,000 sacos de cemento producidos con el sistema PLC propuesto, comparándolos con los datos de línea base del sistema actual.

Los resultados de la prueba piloto en cuanto a precisión de pesaje se presentan en la Tabla 8:

Tabla 8

Resultados de la prueba piloto de validación.

Indicador de pesaje	Sistema actual (línea base)	Sistema PLC propuesto
Peso promedio (kg)	42.487	42.498
Desviación estándar (kg)	±0.348	±0.045
Sacos fuera de especificación (%)	18.3%	2.4%

Indicador de pesaje	Sistema actual (línea base)	Sistema PLC propuesto
Reducción del error de pesaje	—	87.1%
Paradas no programadas (por turno)	1.41	0.40
Reducción de paradas	—	71.6%
Velocidad de producción (sacos/h)	1,980	2,210
Incremento de velocidad de producción	—	+11.6%

Nota: Elaboración propia.

Los resultados de la prueba piloto demuestran una mejora sustancial en todos los indicadores evaluados. La reducción del 87.1 % en el error de pesaje (de +/- 0.348 kg a +/- 0.045 kg de desviación estándar) supera el objetivo planteado de alcanzar una desviación inferior a +/- 0.100 kg. Este resultado es coherente con antecedentes de automatización de procesos de llenado de materiales en polvo, donde el uso de PLC permitió disminuir la variabilidad del peso final del producto (Villalobos & Mora, 2022).

La reducción del 71.6 % en las paradas no programadas evidencia que la eliminación de los ajustes manuales y el control adaptativo ante variaciones del índice de Blaine son efectivos para mantener la continuidad operativa de la línea. El incremento del 11.6 % en la velocidad de producción es una consecuencia directa de la disminución de los tiempos de ajuste y la eliminación de la mayoría de las interrupciones por rechazo de sacos.

La figura 15 muestra a especificación (42.5 kg) registrada durante la prueba piloto de validación del sistema PLC.

Figura 15: Lectura de peso conforme



Nota: Elaboración propia

4.5 Indicadores de desempeño proyectados para la Implementación Definitiva

Con base en los resultados de la prueba piloto, se proyectaron los indicadores de desempeño esperados para la implementación definitiva del sistema PLC en la línea completa de ensacado de Cemento Chagres.

La tabla 9 muestra que los resultados corresponden a estimaciones obtenidas a partir de la propuesta de automatización mediante PLC.

Tabla 9

Indicadores de desempeño proyectados tras la implementación definitiva del PLC.

Indicador	Situación actual	Proyección con PLC	Mejora
Desviación estándar del peso (kg)	±0.348	±0.045	−87.1%
Tasa de sacos no conformes (%)	18.3%	2.4%	−86.9%
Paradas no programadas / turno	1.41	0.40	−71.6%
Horas de parada / trimestre	84.2 horas	~24 horas	−71.6 %
Velocidad de producción (sacos/h)	1,980	2,210	+11.6%
Pérdida de cemento por sobrellenado (ton/mes)	Estimado 4.8 t	Estimado 0.6 t	−87.5%
OEE de la línea de ensacado (%)	71.3%	88.5%	+17.2 p.p. (+24.1 %)

Nota: Elaboración propia.

La proyección de un OEE de 88.5 % representa una mejora significativa respecto al 71.3 % actual, equivalente a un incremento de 17.2 puntos porcentuales. Este resultado sitúa a la línea de ensacado de Cemento Chagres en un nivel competitivo de desempeño operacional. En manufactura, los indicadores de desempeño permiten evaluar disponibilidad, rendimiento y calidad del equipo, por lo que el OEE es una referencia útil para valorar la efectividad global de la línea (ISO, 2014; Wireman, 2020).

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

El presente capítulo sintetiza los principales hallazgos de la investigación en respuesta directa a cada objetivo específico planteado, determinando el grado de cumplimiento de los resultados esperados con la implementación del sistema de control automatizado propuesto.

Con base en el objetivo planteado en el presente trabajo de grado y los resultados obtenidos durante el diagnóstico, el diseño del sistema y la validación mediante prueba piloto, se presentan las siguientes conclusiones:

Conclusión 1. Relativa al Diagnóstico de Proceso Actual

El diagnóstico del proceso de ensacado de Cemento Chagres permitió cuantificar la magnitud de la deficiencia operativa existente: el 18.3 % de los sacos producidos presenta un peso fuera de la especificación de ± 0.5 kg, la desviación estándar del peso es de ± 0.348 kg y las paradas no programadas asociadas al control de pesaje consumen aproximadamente 84.2 horas de tiempo productivo por trimestre. Estos datos establecen una línea base sólida que sustenta técnica y económicamente la necesidad de la intervención propuesta.

Conclusión 2. Relativa a la Variable Crítica del Proceso

El análisis estadístico confirma que el índice de Blaine del cemento es la variable de perturbación principal del proceso de ensacado, con un coeficiente de correlación de Pearson de $r = 0.847$ ($p < 0.001$) respecto al error de peso de los sacos. Esta correlación positiva fuerte valida la estrategia de control adaptativo propuesta, en la que el índice de Blaine actúa como variable de entrada para el ajuste dinámico de los parámetros de llenado del PLC.

Conclusión 3. Relativa al diseño lógico de control

La lógica de control diseñada en lenguaje Ladder Diagram para el PLC Siemens S7-1200, basada en rangos del índice de Blaine y en un algoritmo PID discreto para la corrección continua del tiempo de anticipación de corte de la válvula, constituye una solución técnica viable y compatible con la infraestructura tecnológica existente en Cemento Chagres. La organización del programa en rutinas específicas (OB1, FC1 y FC2) facilita el mantenimiento, la modificación de parámetros y el diagnóstico de fallas.

Conclusión 4. Relativa a la Validación de la Propuesta

La prueba piloto de validación del sistema PLC propuesto demostró una reducción del 87.1 % en el error de pesaje (de +/- 0.348 kg a +/- 0.045 kg), una disminución del 71.6 % en las paradas no programadas por turno y un incremento del 11.6 % en la velocidad de producción.

Estos resultados superan significativamente las metas establecidas en el diseño del sistema, confirmando que la implementación del control automatizado adaptativo es técnicamente efectiva para resolver la problemática identificada.

Conclusión 5. Relativa al impacto general del proyecto

La implementación del sistema PLC adaptativo en la línea de ensacado de Cemento Chagres proyecta un incremento del OEE de 71.3 % a 88.5 %, equivalente a una mejora de 17.2 puntos porcentuales. La reducción de la pérdida de cemento por sobrellenado en 87.5 % y la disminución de 86.9 % en la tasa de sacos no conformes representan beneficios económicos y de calidad directamente cuantificables. El proyecto demuestra que la automatización industrial correctamente aplicada constituye una inversión estratégica viable para la industria cementera panameña.

CAPÍTULO VI

RECOMENDACIONES

CAPÍTULO VI

RECOMENDACIONES

Este capítulo presenta las recomendaciones derivadas de los resultados y conclusiones del estudio, dirigidas a Cemento Chagres para la implementación definitiva del sistema, así como sugerencias para futuras investigaciones relacionadas con la automatización de procesos industriales en el sector cementero panameño.

A partir de los resultados obtenidos y las conclusiones del presente trabajo de investigación, se presentan las siguientes recomendaciones:

Recomendaciones para Cemento Chagres

1. Proceder a la implementación definitiva del sistema PLC Siemens S7-1200 con módulo de pesaje SIWAREX WP231 y pantalla HMI KTP700 en la línea de ensacado número 1, programando la parada de mantenimiento necesaria en el próximo periodo planificado, dado que la prueba piloto validó la efectividad y viabilidad técnica de la propuesta.
2. Capacitar al personal técnico de mantenimiento eléctrico e instrumentación en la programación y mantenimiento del PLC Siemens S7-1200 y del entorno TIA Portal V17, para garantizar la continuidad operativa del sistema sin depender de soporte técnico externo en tareas rutinarias.
3. Establecer un procedimiento formal para ingresar el índice de Blaine al sistema HMI al inicio de cada turno, vinculando el reporte de laboratorio de calidad con el sistema de control mediante integración de datos en tiempo real, con el fin de reducir errores de transcripción y mejorar la trazabilidad.
4. Realizar la calibración de la celda de carga y del módulo de pesaje SIWAREX de forma semestral, siguiendo las instrucciones del fabricante y los requisitos de control metrológico aplicables, para mantener la exactitud del sistema dentro de los límites validados.

5. Evaluar la extensión del sistema PLC adaptativo a las demás líneas de ensacado de la planta y analizar la factibilidad de integrarlo con el sistema SCADA corporativo para gestionar indicadores de producción y calidad en tiempo real.

Recomendaciones para investigaciones futuras

1. Investigar la integración del índice Blaine en tiempo real mediante modelos de aprendizaje automático aplicados a variables de proceso medibles en línea, tal como proponen Topaloğlu et al. (2026), para eliminar la dependencia del ingreso manual del operador y avanzar hacia un sistema de control más autónomo.
2. Desarrollar un estudio de retorno de inversión (ROI) que cuantifique los ahorros generados por la reducción del desperdicio de cemento, la disminución de paradas y el incremento de producción, con el fin de sustentar económicamente la réplica del proyecto.
3. Explorar la implementación de mantenimiento predictivo basado en las tendencias de alarmas registradas por el PLC, para anticipar fallas mecánicas en la ensacadora Rotopacker antes de que generen paradas no planificadas.

Referencias

- ASTM International. (2023). Standard test methods for fineness of hydraulic cement by air-permeability apparatus (ASTM C204-23). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C0204-23>
- Bolton, W. (2015). Programmable logic controllers (6th ed.). Newnes.
- Comisión Panameña de Normas Industriales y Técnicas. (1999). Norma Técnica Panameña COPANIT 47-1999: Cemento Portland. Ministerio de Comercio e Industrias.
- Decreto Ejecutivo No. 306 de 4 de septiembre de 2002. Que adopta el reglamento para el control de los ruidos en espacios públicos, áreas residenciales o de habitación, así como en ambientes laborales. Gaceta Oficial No. 24,635.
- García, L., Restrepo, M., & Suárez, J. (2021). Optimización del proceso de dosificación en plantas cementeras mediante control adaptativo PLC-SCADA. Revista Ingeniería y Competitividad, 23(2), 45-62. <https://doi.org/10.25100/iyv.v23i2.10342>
- Groover, M. P. (2019). Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing (5th ed.). Pearson.
- Haver & Boecker. (2020). ROTO-PACKER operating and service manual (Rev. 4.2). Haver & Boecker OHG.
- Hernández, R., & Pineda, A. (2020). Propuesta de automatización del sistema de pesaje y llenado de sacos en una empresa procesadora de cal en Panamá [Trabajo de grado de licenciatura, Universidad Tecnológica de Panamá. Repositorio Institucional UTP.
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, P. (2014). Metodología de la investigación (6.^a ed.). McGraw-Hill.
- IEC. (2025). IEC 61131-3:2025: Programmable controllers - Part 3: Programming languages. International Electrotechnical Commission.
- International Organization for Standardization. (2014). Automation systems and integration - Key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management - Part 2: Definitions and descriptions (ISO 22400-2:2014). ISO.
- Lamb, F. (2018). Industrial automation: Hands-on (2nd ed.). McGraw-Hill Education.

- Ogata, K. (2010). Modern control engineering (5th ed.). Prentice Hall.
- Organización Internacional del Trabajo. (2021). Technology, automation, and the future of work in developing countries. International Labour Office.
- República de Panamá. (1999). Ley No. 59 de 29 de julio de 1999, por la cual se dictan normas de normalización técnica, calidad, metrología y conversión al Sistema Internacional de Unidades. Gaceta Oficial No. 23,853. <https://www.gacetaoficial.gob.pa/>
- Siemens AG. (2015). SIWAREX WP231 weighing module: Operating instructions. Siemens Industry Online Support.
- Siemens AG. (2025). S7-1200 programmable controller: System manual. Siemens Industry Online Support.
- Topaloğlu, M. T., Macit, C. K., Uçar, U. U., & Tanyeri, B. (2026). Prediction of Blaine fineness of final product in cement production using industrial quality control data based on chemical and granulometric inputs using machine learning. Applied Sciences, 16(4), 2046. <https://doi.org/10.3390/app16042046>
- Villalobos, C., & Mora, D. (2022). Sistema de control PLC para línea de envasado de materiales en polvo en la industria agroalimentaria [Trabajo de grado de licenciatura, Universidad de Costa Rica]. Repositorio Institucional UCR.
- Weightman, T. (2020). Industrial weighing systems: Design, installation, and maintenance. Springer.
- Wireman, T. (2020). Total productive maintenance (3rd ed.). Industrial Press.