



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica

Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica

**Implementación de un sistema automatizado para el
llenado de camiones pesados y separación en seco en
una operación minera**

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Electrónico

AUTOR

Carlos Alberto BUSTAMANTE CHACCHA

ASESOR

Mg. Jean Carlos MALCA FERNANDEZ

Lima, Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Bustamante, C. (2026). *Implementación de un sistema automatizado para el llenado de camiones pesados y separación en seco en una operación minera*. [Trabajo de Suficiencia Profesional de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Carlos Alberto Bustamante Chaccha
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	73950245
URL de ORCID	No Aplica
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Jean Carlos Malca Fernández
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	45535181
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-5633-5182
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Tereza Esther Nuñez Zuñiga
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	8006778
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Victor Edmundo Alva Saldaña
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07299248
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Celso Ysidro Geronimo Huaman
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	09191500
Datos de investigación	
Línea de investigación	C.0.4.8 Automatización Industrial
Grupo de investigación	No Aplica
Agencia de financiamiento	No Aplica

Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Ica Provincia: Nazca Distrito: San Juan de Marcona Latitud: -15.210384 Longitud: -75.111963
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Noviembre 2023 - Marzo 2024
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería eléctrica, Ingeniería Electrónica https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.01 Sistemas de automatización, Sistemas de Control https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.03



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y ELÉCTRICA
Teléfono 619-7000 Anexo 4226
Calle Germán Amezaga 375 – Lima 1 – Perú



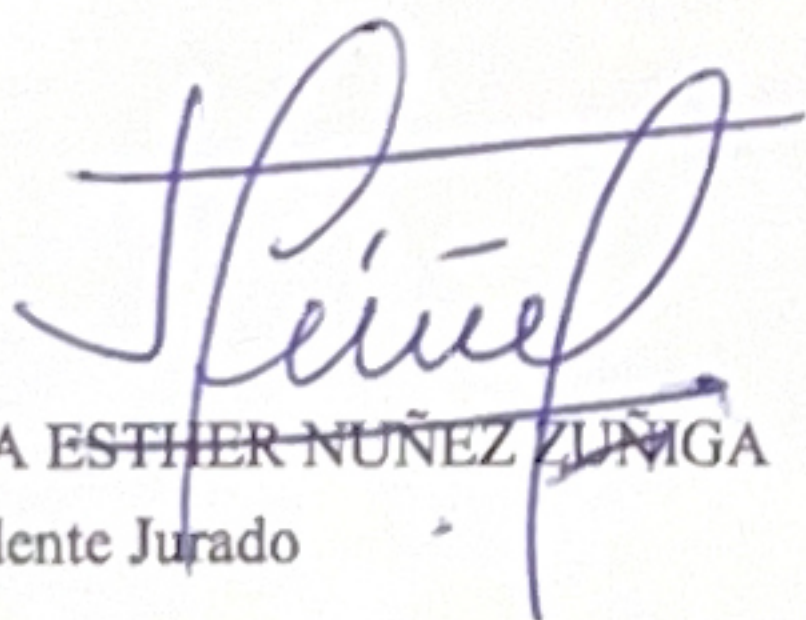
ACTA DE SUSTENTACIÓN
TRABAJO DE
SUFICIENCIA PROFESIONAL
ACTA N°12/FIEE-PPP/2026

Los suscritos Miembros del Jurado, docentes permanentes de las Escuelas Profesionales de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, reunidos en la fecha 12 de marzo del 2026, como presidente de Jurado la **DRA. TERESA ESTHER NUÑEZ ZUÑIGA**, integrado por el Miembro de Jurado el **ING. VICTOR EDMUNDO ALVA SALDAÑA**, el Miembro de Jurado el **DR. CELSO YSIDRO GERONIMO HUAMAN** y Miembro Asesor el **MG. JEAN CARLOS MALCA FERNANDEZ**.

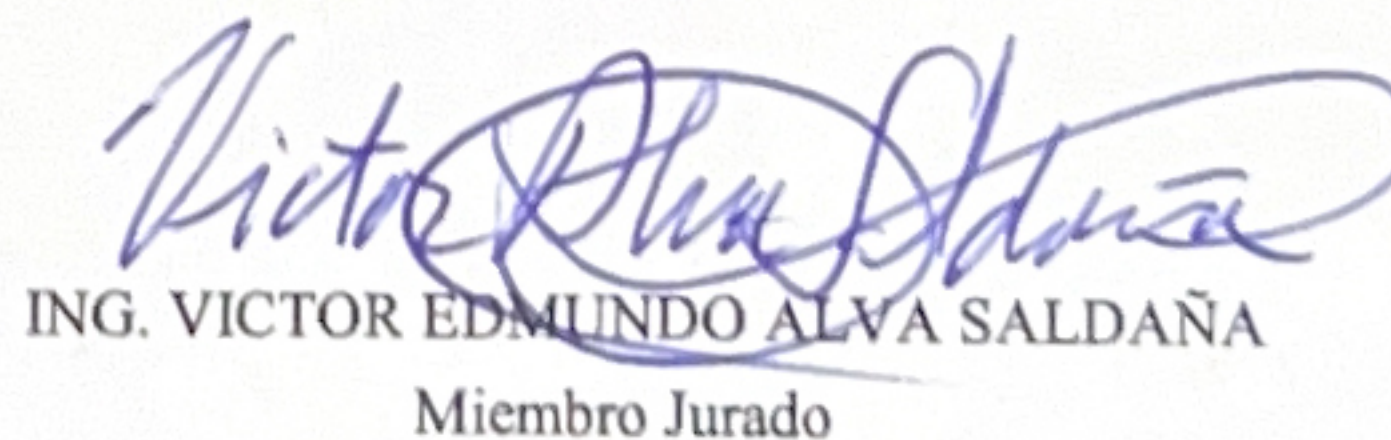
Después de escuchar la Sustentación Presencial del Trabajo de Suficiencia Profesional del Bachiller **CARLOS ALBERTO BUSTAMANTE CHACCHA** con código 12190084 que para optar el Título Profesional de Ingeniero Electrónico sustentó el Trabajo de Suficiencia Profesional titulado **IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO PARA EL LLENADO DE CAMIONES PESADOS Y SEPARACIÓN EN SECO EN UNA OPERACIÓN MINERA**.

El jurado examinador procedió a formular las preguntas reglamentarias y, luego de una deliberación en privado, decidió otorgarle el calificativo de 18 (Dieciocho)

Ciudad Universitaria, 12 de marzo del 2026



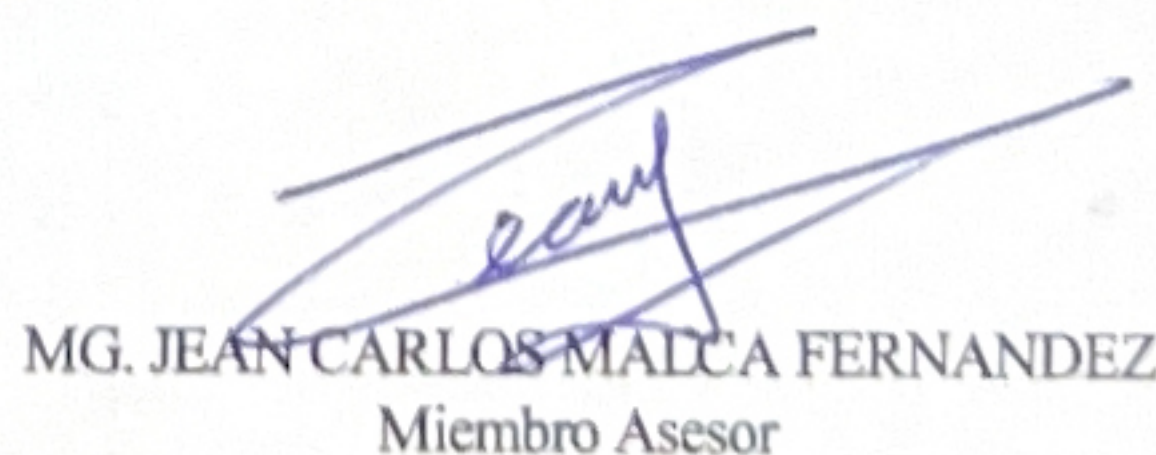
DRA. TERESA ESTHER NUÑEZ ZUÑIGA
Presidente Jurado



ING. VICTOR EDMUNDO ALVA SALDAÑA
Miembro Jurado



DR. CELSO YSIDRO GERONIMO HUAMAN
Miembro Jurado



MG. JEAN CARLOS MALCA FERNANDEZ
Miembro Asesor



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE
SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, **JEAN CARLOS MALCA FERNANDEZ** en mi condición de asesor acreditado con el Dictamen N°09/FIEE-PPP/2026 del Trabajo de Suficiencia Profesional titulado **IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO PARA EL LLENADO DE CAMIONES PESADOS Y SEPARACIÓN EN SECO EN UNA OPERACIÓN MINERA**, presentado por el bachiller **CARLOS ALBERTO BUSTAMANTE CHACCHA**, para optar al título profesional de Ingeniero Electrónico. CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 5% de similitud, nivel PERMITIDO para continuar con los trámites correspondientes y para su publicación en el repositorio institucional.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título de Ingeniero Electrónico.

Lima, 12 de Marzo del 2026


Firma del Asesor

DNI: 45535181

Nombres y apellidos del asesor:

JEAN CARLOS MALCA FERNANDEZ

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mi familia y en especial a mi madre, quien me impulsa a cumplir mis metas tanto profesionales como espirituales.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento a RTS AUTOMATION SAC y a sus profesionales que vienen contribuyendo al desarrollo de la automatización industrial en el país.

RESUMEN

El presente trabajo describe el desarrollo e implementación de un sistema de automatización para el llenado de camiones pesados y el control del proceso de separación en seco (Dry Cobbing) en el área de mina de una compañía minera dedicada a la explotación y procesamiento de mineral de hierro. La propuesta surge ante la necesidad de reducir la operación manual, incrementar la seguridad operativa, optimizar el control del proceso y disponer de información en tiempo real que permita una adecuada toma de decisiones y contribuya a la reducción de paradas no programadas de producción. La implementación comprendió la automatización del proceso de llenado de camiones, incorporando instrumentación de nivel, sensores de posición y lógica secuencial de control, así como sistemas de supervisión mediante PLC y HMI, que finalmente fueron integrados a un sistema SCADA preexistente en la planta. Asimismo, se logró la implementación del control del sistema de separación en seco (Dry Cobbing), extendiendo su supervisión a todas las áreas involucradas, lo que permitió el monitoreo desde múltiples puntos, la visualización de alarmas e interlocks, y el accionamiento remoto de fajas transportadoras y poleas magnéticas, respetando la lógica de seguridad previamente establecida.

Como resultado, el sistema implementado permite una operación más eficiente, segura y confiable, reduciendo la dependencia del factor humano, optimizando el uso de horas hombre y facilitando el diagnóstico de fallas y la planificación del mantenimiento.

Palabras clave: Dry Cobbing, automatización, radioenlace, instrumentación, programación.

ABSTRACT

This work describes the development and implementation of an automation system for heavy truck loading and the control of the dry separation process (Dry Cobbing) in the mine area of a mining company dedicated to the exploitation and processing of iron ore. The proposal arises from the need to reduce manual operation, increase operational safety, optimize process control, and provide real-time information that enables effective decision-making and contributes to the reduction of unplanned production downtime.

The implementation included the automation of the truck loading process, incorporating level instrumentation, position sensors, and sequential control logic, as well as supervision systems based on PLC and HMI, which were ultimately integrated into an existing SCADA system within the plant. In addition, the control of the dry separation system (Dry Cobbing) was implemented, extending its supervision to all involved areas. This allowed multi-point monitoring, visualization of alarms and interlocks, and remote operation of conveyor belts and magnetic pulleys, while respecting the previously established safety logic.

As a result, the implemented system enables a more efficient, safe, and reliable operation, reducing dependence on human intervention, optimizing the use of manpower, and facilitating fault diagnosis and maintenance planning.

Keywords: Dry Cobbing, automation, radio link, instrumentation, programming.

INDICE GENERAL

CARATULA	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
INDICE GENERAL	vi
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE CUADROS	xi
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo del informe	3
1.2 Estructura del informe	4
CAPITULO II: INFORMACIÓN DEL LUGAR DONDE SE DESARROLLÓ LA ACTIVIDAD	5
2.1 Institución – Actividad que desarrolla	5
2.2 Periodo de duración de la actividad	5
2.3 Finalidad y objetivos de la entidad	5
2.4 Razón social	5
2.5 Dirección postal	6
2.6 Nombre y correo electrónico del profesional a cargo	6
CAPITULO III: DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD	7
3.1 Organización de la actividad	7
3.2 Finalidad y objetivos de la Actividad	7
3.2.1 Finalidad	7
3.2.2 Objetivos	7
3.3 Problemática	8
3.3.1 Problema General	8
3.3.2 Problemas Específicos	8

3.3.3	Justificación e importancia de la investigación	9
3.4	Metodología	10
3.4.1	Bases teóricas	11
3.4.2	Marco conceptual	13
3.5	Procedimiento	18
3.5.1	Ubicación de los puntos de instalación	18
3.5.2	Elección de los equipos del sistema de control	25
3.5.3	Elección de los instrumentos	27
3.5.4	Ubicación y consideraciones para los tableros de control	29
3.5.5	Montaje y ubicación de equipos	30
3.6	Resultado de la actividad	31
3.6.1	Arquitectura del sistema de control	31
3.6.2	Señales de control y monitoreo	33
3.6.3	Modos de control	36
3.6.4	Filosofía de control	39
3.6.5	Lógica de control en PLC	48
CAPITULO IV: DISCUSIÓN DE RESULTADOS		61
4.1	Descripción de la implementación	61
4.1.1	Descripción de las pantallas de operador	61
4.1.2	Pantalla general	61
4.1.3	Instalación de equipos en campo	67
4.1.4	Pruebas de funcionamiento	73
4.2	Evaluación económica	86
CAPITULO V: CONCLUSIONES		90
CAPITULO VI: RECOMENDACIONES		91
CAPITULO VII: BIBLIOGRAFÍA		92
CAPITULO VIII: ANEXOS		94

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Organigrama de la actividad.	7
Figura 2: Determinación de la distancia de un sistema de radar FMCW.	16
Figura 3: PLC S7-1200 y módulos.	17
Figura 4: SIMATIC HMI COMFORT PANELS.	18
Figura 5: Ubicación de los puntos de instalación.	19
Figura 6: Esquema general de las áreas de operación.	20
Figura 7: Tolva de material estéril.	21
Figura 8: Controles existentes en el área 100.	21
Figura 9: Torre de fajas DryCobbing. .	22
Figura 10: Controles existentes en el área 200. .	22
Figura 11: Faja 3011.	23
Figura 12: Cabina de operador planta 2.	24
Figura 13: Transmisor de nivel tipo radar.	28
Figura 14: Sensores de posición transmisor y receptor.	28
Figura 15: Posición de montaje instrumentos. .	31
Figura 16: Diagrama de arquitectura de control. .	33
Figura 17: Diagrama de flujo de control automático de llenado de camiones.	44
Figura 18: Ciclo de arranque del CPU de un PLC.	50
Figura 19: Rutina de inicialización OB100.	51
Figura 20: Principales funciones del programa principal OB1.	51
Figura 21: Código SCL 100_DATA_IN_OUT.	52
Figura 22: Lógica de bloque de función IO_DI.	53
Figura 23: Interfaz gráfica de bloque de función IO_DI.	53
Figura 24: Lógica de bloque de función IO_DO.	54
Figura 25: Lógica SCL de bloque de función IO_AI.	55
Figura 26: Interfaz gráfica de bloque de función IO_AI.	57

Figura 27: Código SCL para sistema automático estado fuera de servicio.	58
Figura 28: Código SCL para sistema automático estado verificación de condiciones de llenado.	59
Figura 29: Código SCL para sistema automático estado en espera de camión.	60
Figura 30: Barra superior de pantallas HMI.	61
Figura 31: Pantalla general de HMI.	62
Figura 32: Pantalla sistema de llenado de camiones manual de HMI.	63
Figura 33: Pantalla sistema de llenado de camiones automático de HMI.	64
Figura 34: Pantalla de sistema de separación en seco de HMI.	66
Figura 35: Pantalla configuración de sistema de tolva de HMI.	66
Figura 36: Tableros montados en sus áreas respectivas.	68
Figura 37: Antenas montadas en el área 100.	69
Figura 38: Antenas montadas en el área 200 y 300.	70
Figura 39: Antena montada en el área 400.	70
Figura 40: Transmisores de nivel LIT10002 y LIT10003.	71
Figura 41: Sensores de posición inductivos ZS10001 y ZS10002.	71
Figura 42: Sensores emisores y receptores para detección de posición.	72
Figura 43: Cámaras y CCTV en sala de control.	73
Figura 44: Prueba de instrumentos análogos.	74
Figura 45: Pruebas de instrumentos digitales.	75
Figura 46: Gráfico de Potencia de antena 100-RF-001 en los meses de marzo-abril.	77
Figura 47: Monitoreo de variables en pruebas de lógica de control.	79
Figura 48: Sistema listo y en espera de camión.	80
Figura 49: Sistema detectando dimensiones correctas.	81
Figura 50: Sistema detectando dimensiones incorrectas de camión.	81
Figura 51: <i>Sistema después de un llenado.</i>	83
Figura 52: Pantalla de sistema de separación en seco en el SCADA de chancado primario.	85
Figura 53: Lista de equipos en tablero de control 100-CP-001.	94
Figura 54: Disposición de equipos en tablero de control 100-CP-001.	94
Figura 55: Lista de equipos en tablero de control 200-CP-001.	95

Figura 56: Disposición de equipos en tablero de control 200-CP-001.	95
Figura 57: Lista de equipos en tablero de control 300-CP-001.	95
Figura 58: Disposición de equipos en tablero de control 300-CP-001.	96
Figura 59: Lista de equipos en tablero de control 400-CP-001.	96
Figura 60: Disposición de equipos en tablero de control 400-CP-001.	96
Figura 61: Típico de montaje de instrumento ZES-10001 y ZX-10001.	97
Figura 62: Típico de montaje de cámara de video 100-CAM-001.	98
Figura 63: Típico de montaje de instrumento LIT-10001.	99
Figura 64: Típico de montaje de sensores de posición inductivos ZS-10001 y ZS-10002.	100
Figura 65: Código en lenguaje SCL de la secuencia de llenado automático Parte 1.	101
Figura 66: Código en lenguaje SCL de la secuencia de llenado automático Parte 2.	102
Figura 67: Código en lenguaje SCL de la secuencia de llenado automático Parte 3.	103
Figura 68: Código en lenguaje SCL de la secuencia de llenado automático Parte 4.	104
Figura 69: Código en lenguaje SCL de la secuencia de llenado automático Parte 5.	105

LISTA DE CUADROS

<i>Cuadro 1</i> Ubicación y etiquetas de tableros del sistema.	29
<i>Cuadro 2</i> Equipos de red de control y CCTV.	32
<i>Cuadro 3</i> Señales discretas en el controlador principal.	34
<i>Cuadro 4</i> Señales análogas en el controlador principal	34
<i>Cuadro 5</i> Señales de monitoreo y control DryCobbing.	35
<i>Cuadro 6</i> Modos de control	37
<i>Cuadro 7</i> Permisivos para el arranque manual de fajas	41
<i>Cuadro 8</i> Secuencia de llenado automático.	45
<i>Cuadro 9</i> Lista de enclavamientos del sistema de llenado automático.	46
<i>Cuadro 10</i> Lista de alarmas del sistema de llenado automático.	47
<i>Cuadro 11</i> Principales bloques en el controlador PLC.	48
<i>Cuadro 12</i> Prueba de enclavamientos sistema de llenado de camiones.	78
<i>Cuadro 13</i> Cuadro de costos	87
<i>Cuadro 14</i> Calculo de ahorro de horas hombre	88
<i>Cuadro 15</i> Cuadro de flujo de caja	89

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

La minería constituye uno de los principales motores del desarrollo económico del Perú, al representar una fuente significativa de ingresos económicos y generación de empleo. En el caso de la minería de hierro, esta actividad se desarrolla principalmente en operaciones de gran escala, destacando la región de Marcona–Ica, donde se concentran las operaciones con mayor volumen de producción de concentrado de hierro, desempeñando un papel estratégico en la exportación de este recurso. Dentro del proceso de beneficio del hierro, las etapas de chancado y separación del material cumplen un rol fundamental, ya que permiten la clasificación del mineral y la separación del material estéril previo a su procesamiento posterior. Para mantener la eficiencia y competitividad de este tipo de operaciones, resulta indispensable optimizar los procesos productivos mediante la incorporación de tecnologías que permitan mejorar el control, la seguridad y el desempeño operacional. A continuación, se menciona las razones por lo que es importante asegurar la operación continua y eficiente del proceso de separación en seco:

- Continuidad del proceso productivo

La disponibilidad permanente del sistema de separación en seco es fundamental para garantizar la continuidad del proceso de beneficio del hierro, evitando interrupciones que puedan afectar la alimentación de las etapas posteriores y el cumplimiento de los objetivos de producción.

- Calidad del mineral procesado

La operación continua del sistema garantiza una alimentación más homogénea hacia las siguientes etapas del proceso, evitando variaciones en la ley del mineral que puedan afectar la eficiencia global de la planta.

- Logística y el transporte de material

La continuidad del sistema de separación en seco permite una coordinación adecuada con el llenado y despacho de camiones, evitando tiempos muertos, colas innecesarias y desbalances en la operación de transporte.

- Seguridad de la operación

La operación bajo condiciones manuales o transitorias incrementa la exposición del personal a riesgos. Un sistema automatizado reduce la necesidad de intervenciones directas en campo. La operación estable y controlada evita arranques y paradas frecuentes, sobrecargas y condiciones anómalas que aceleran el desgaste de los equipos mecánicos y eléctricos.

- Gestión del mantenimiento

Un sistema que opera de manera continua y monitoreada permite programar mantenimientos predictivos y preventivos, evitando intervenciones correctivas de emergencia que afectan la producción.

A continuación, se menciona las razones por lo que es importante contar con un sistema de llenado automático para el llenado de camiones pesados que cumplen la función de acarrear el material estéril derivado de la separación en seco a canchas de almacenamiento.

- Garantizar un llenado controlado y uniforme

La automatización del llenado permite controlar de manera precisa la cantidad de material descargado en cada camión, evitando sobrecargas o subcargas

que afectan la seguridad, la eficiencia del transporte y el cumplimiento de la capacidad óptima de carga.

- Reducir la dependencia de la operación manual

El llenado manual requiere la intervención constante del operador para accionar la compuerta, verificar niveles y coordinar con el conductor, lo que incrementa la probabilidad de errores humanos. La automatización estandariza el proceso y reduce la variabilidad operativa.

- Optimizar los tiempos de carga y despacho

Un sistema automático reduce los tiempos muertos durante el proceso de llenado, permitiendo ciclos de carga más rápidos y repetitivos, lo que mejora la productividad y la continuidad del transporte del material estéril.

Con la finalidad de optimizar el proceso y la supervisión de los procesos mencionados, la automatización industrial se adopta como una solución estratégica, al proporcionar las herramientas necesarias para alcanzar los objetivos propuestos.

En este contexto, se desarrolló la implementación de un sistema de automatización para el llenado de camiones pesados y el control del sistema de separación en seco, el cual moderniza el control de las operaciones y reemplaza las prácticas previamente manuales por un esquema de control y supervisión automatizado.

1.1 Objetivo del informe

El objetivo del presente informe es exponer el desarrollo de la implementación de un sistema de automatización para el llenado de camiones pesados y el control del sistema de separación en seco para una compañía minera que explota y procesa mineral de hierro en la región de Ica.

1.2 Estructura del informe

En el capítulo II del presente se muestra la información de la empresa, el lugar y tiempo de la implementación. A continuación, en el capítulo III se presenta la descripción de la actividad, que comprenden los objetivos, la problemática identificada y la metodología aplicada. En este capítulo se detallan los procedimientos técnicos relacionados con las áreas de montaje, comunicación de equipos, programación, instrumentación y filosofía de control. En el capítulo IV se presenta la discusión de los resultados obtenidos, donde se analiza el desempeño del sistema implementado, incluyendo el montaje, la programación de los equipos y pantallas, así como las pruebas funcionales realizadas. Posteriormente, en el capítulo V se exponen las conclusiones del trabajo desarrollado y, finalmente, en el capítulo VI se formulan las recomendaciones orientadas a asegurar el correcto funcionamiento del sistema.

CAPITULO II: INFORMACIÓN DEL LUGAR DONDE SE DESARROLLÓ LA ACTIVIDAD

2.1 Institución – Actividad que desarrolla

Las actividades del presente trabajo se desarrollaron en las instalaciones de la COMPAÑÍA MINERA SHOUGANG HIERRO PERU por la empresa contratista RTS AUTOMATION SAC.

2.2 Periodo de duración de la actividad.

La actividad se realizó en el periodo comprendido entre 23 de noviembre del 2023 y 05 de marzo del 2024.

2.3 Finalidad y objetivos de la entidad

Ser líderes a nivel nacional en cada una de las actividades que se desarrolla, manteniendo siempre valores, fortaleciendo capacidades y aprovechando la experiencia para ofrecer las mejores soluciones tecnológicas. Ser reconocidos por clientes actuales y clientes potenciales como su mejor alternativa, basados siempre en la calidad, confiabilidad, profesionalismo, responsabilidad y en la capacidad de adaptación.

2.4 Razón social

RTS AUTOMATION SAC

2.5 Dirección postal

Jirón Huaraz 1882, Cercado de Lima- Lima - Perú

2.6 Nombre y correo electrónico del profesional a cargo

Jesús Javier Liñan Munaya – Ingeniero de Proyectos de automatización

Jliñan@rts-auto.com

CAPITULO III: DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD

3.1 Organización de la actividad

La organización de la actividad se estructura conforme al esquema presentado en la Figura 1.

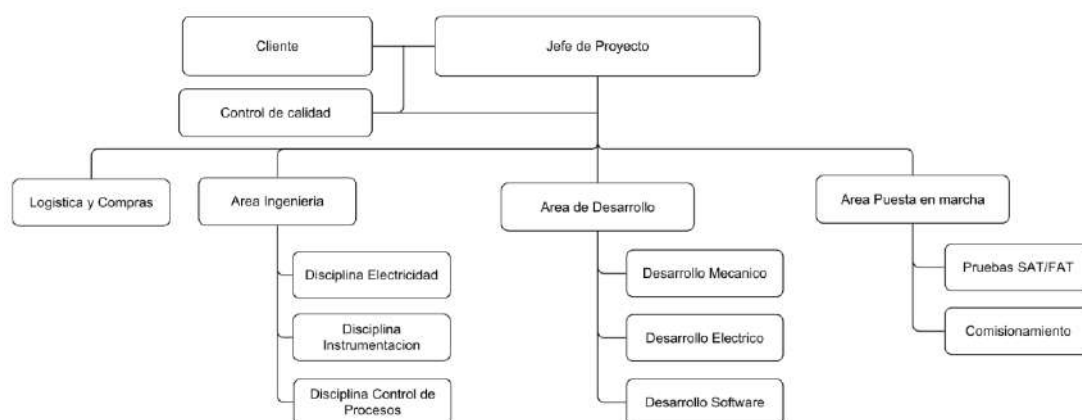


Figura 1: **Organigrama de la actividad.** Fuente: Elaboración Propia

3.2 Finalidad y objetivos de la Actividad

3.2.1 Finalidad

El presente trabajo tiene como finalidad describir el desarrollo de la implementación de un sistema de automatización para el llenado de camiones pesados y el control del proceso de separación en seco, con el propósito de garantizar una operación segura y eficiente.

3.2.2 Objetivos

3.2.2.1 Objetivo general

Implementar un sistema de automatización para el llenado de camiones pesados y el control del proceso de separación en seco en una compañía minera en Ica para una operación segura y eficiente.

3.2.2.2 Objetivos específicos

- Implementar un sistema automatizado para el llenado de material estéril en camiones volquete, que opere con mínima intervención del operador.
- Implementar un sistema de control para el proceso de separación en seco del área de chancado que permita el accionamiento desde todos los puntos de control implementados.
- Ejecutar las pruebas funcionales, el comisionamiento y la puesta en marcha de los sistemas implementados, con la finalidad de evaluar su correcto funcionamiento y desempeño operativo.

3.3 Problemática

3.3.1 Problema General

¿Cómo implementar un sistema de automatización para el llenado de camiones pesados y el control del proceso de separación en seco para que pueda ser operado de una manera segura y eficiente?

3.3.2 Problemas Específicos

- ¿De qué manera se puede implementar un sistema automatizado para el llenado de material estéril en camiones volquete que opere con la mínima intervención del operador?

- ¿De qué manera se puede implementar un sistema de control para el proceso de separación en seco del área de chancado que permita el accionamiento desde todos los puntos de control implementados?
- ¿Cómo ejecutar las pruebas funcionales, el comisionamiento y la puesta en marcha de los sistemas implementados para evaluar su correcto funcionamiento y desempeño operativo?

3.3.3 Justificación e importancia de la investigación

Justificación practica

La implementación de un sistema automatizado para el llenado de camiones pesados y el control del proceso de separación en seco se justifica por la necesidad de mejorar la seguridad y la eficiencia operativa del proceso. Antes de la ejecución de este proyecto, las operaciones se realizaban de manera manual, con una alta dependencia del operador para el monitoreo de instrumentos, inspecciones visuales, coordinación de arranques y control del proceso de llenado.

Las áreas involucradas operaban de forma aislada, sin acceso a información en tiempo real ni a registros históricos de eventos, lo que dificultaba el análisis de fallas y la toma de decisiones operativas. Esta condición incrementaba la probabilidad de errores humanos, generando daños a equipos y paradas no programadas de producción. El sistema de automatización implementado permite el registro de la información del proceso, monitoreo en tiempo real, registro de eventos y variables operativas. Estas características permiten reducir riesgos, optimizar la operación y fortalecer la seguridad del personal y de los equipos.

Justificación económica

La implementación de un sistema automatizado para el llenado de camiones pesados y el control del proceso de separación en seco se justifica económicamente, ya que permite reducir paradas innecesarias de planta al proporcionar información en tiempo real para la toma de decisiones

operativas, optimizar las actividades de mantenimiento mediante el registro de variables, y mejorar el aprovechamiento del recurso humano al disminuir el uso de horas hombre en tareas repetitivas o fácilmente automatizables, lo que se traduce en una operación más eficiente y rentable.

3.4 Metodología

El desarrollo de la implementación del sistema de control automatizado para el llenado de camiones pesados y control del sistema de separación en seco se organizó de la siguiente manera:

- Levantamiento de la información de las condiciones del proceso, equipos y sistemas existentes.
- Desarrollo de documentación de ingeniería y configuración previa de equipos.
- Implementación de los sistemas en las áreas correspondientes (montaje, canalizado y configuración de equipos in situ)
- Pre-comisionamiento y registro de datos: verificación de la instalación de los instrumentos, pruebas de señales eléctricas (AI, DI, AO y DO) desde campo hasta el PLC. Validación de escalamiento, direccionamiento y adquisición de datos en el sistema de control, verificación de las comunicaciones entre el PLC, las pantallas HMI y el sistema SCADA. Se realiza el registro inicial de variables para el comisionamiento.
- Comisionamiento y puesta en marcha: Ejecución de pruebas funcionales y dinámicas del sistema en condiciones reales de operación. Verificación y ajuste de la lógica de control, secuencias, enclavamientos y alarmas. Corrección y ajustes de parámetros. Documentación correspondiente y validación operativa del sistema implementado.

3.4.1 Bases teóricas

Tómala Apolinario (2025) desarrolló un sistema automatizado de control y monitoreo para el proceso de llenado de granos en una línea de producción industrial, con el objetivo de optimizar la precisión, eficiencia y confiabilidad del proceso de dosificación de materiales sólidos. El diseño del sistema integró un controlador lógico programable Siemens S7-1200, sensores de nivel y peso, una banda transportadora y un módulo de sellado automático, los cuales fueron coordinados mediante una lógica de control programada en el entorno TIA Portal. La investigación evidenció que el proceso manual de llenado generaba inconsistencias en la cantidad de material dosificado, incrementaba los desperdicios y reducía la eficiencia operativa del sistema. Tras la implementación del sistema automatizado, se logró una mejora significativa en la precisión del llenado, una reducción del desperdicio de material y un incremento en la eficiencia global del proceso productivo, demostrando la viabilidad técnica y operativa de la automatización del proceso de llenado de sólidos mediante PLC y sensores industriales.

Quispe Huamán (2021) desarrolló una investigación orientada al diseño e implementación de un sistema automatizado para el control del proceso de carguío y transporte de mineral en una operación minera subterránea, con el objetivo de mejorar la eficiencia operativa y reducir las pérdidas de material durante la descarga. El estudio evidenció que el manejo manual de compuertas y tolvas generaba tiempos muertos, descontrol en el flujo de mineral y riesgos operativos para el personal involucrado en la operación. La metodología empleada comprendió el diagnóstico del sistema existente, el diseño del sistema de automatización mediante controladores lógicos programables y la evaluación comparativa del desempeño antes y después de la implementación. Los resultados mostraron una reducción significativa del tiempo de carguío por ciclo, así como un incremento en la uniformidad del llenado de los equipos de transporte, concluyendo que la automatización del proceso contribuye a una mejora sustancial en la productividad y seguridad de las operaciones mineras subterráneas.

Ramos Salazar (2020) realizó un estudio enfocado en la automatización del sistema de llenado de camiones pesados en operaciones mineras, con la finalidad de optimizar el control del flujo de material y minimizar errores asociados a la intervención manual. El autor identificó deficiencias en el proceso tradicional de carguío, tales como sobrellenado, subllenado y tiempos prolongados de espera, los cuales afectaban directamente la eficiencia del ciclo de transporte. El trabajo incluyó el diseño de un sistema de control automático basado en sensores de nivel y un sistema de supervisión mediante interfaz hombre-máquina, permitiendo el monitoreo en tiempo real del proceso de llenado. Los resultados obtenidos demostraron una mejora en el factor de llenado de los camiones, reducción de tiempos improductivos y mayor control del proceso, concluyendo que la automatización del carguío constituye una alternativa viable para incrementar la eficiencia operativa en minería a gran escala.

Gutiérrez (2023) desarrolló una investigación con el objetivo de optimizar los procesos de carguío y transporte de mineral en operaciones mineras subterráneas. El estudio partió de la identificación de deficiencias asociadas al proceso manual de llenado de skips, tales como pérdidas de producción, contaminación del área de trabajo y daños recurrentes a los equipos, lo cual impactaba negativamente en la eficiencia operativa del sistema de transporte de mineral. Ante esta problemática, el autor propuso el diseño de un sistema automatizado de cierre y apertura de tolvas para el carguío de skips, el cual fue evaluado mediante un prototipo a escala. El sistema de control fue desarrollado utilizando una plataforma Arduino, integrando sensores infrarrojos para la detección de la posición de los skips y una celda de carga para la medición del peso del material durante el proceso de llenado. Asimismo, se planteó la integración de una interfaz hombre-máquina (HMI) y un encoder de la marca Rockwell, considerando la comunicación mediante la red DeviceNet como alternativa para una futura implementación a escala industrial. Los resultados del estudio evidenciaron que el sistema automatizado propuesto permitió un mayor control del proceso de llenado y transporte de mineral, así como una reducción significativa de los tiempos

operativos. El análisis de tiempos desarrollado en la investigación determinó un ahorro aproximado de 1 hora y 40 minutos por guardia, lo que representó un incremento de 9.84 toneladas de material transportado por turno. Estos resultados, obtenidos a partir de la evaluación del prototipo, sustentan la viabilidad técnica de implementar el sistema con una arquitectura de control más robusta en un entorno operativo real, constituyéndose en un antecedente relevante para investigaciones orientadas a la automatización del llenado y transporte de material sólido en minería.

3.4.2 Marco conceptual

3.4.2.1 Automatización industrial

Acuña (1990) define la automatización industrial como un “medio por el cual los procesos de producción utilizan los avances de la computación para poder controlar las variables de entrada, de proceso y de salida que gobiernan los procesos de producción” que implica maquinaria y demás hardware que permite producir la calidad y cantidad de producto final exigida por el cliente bajo un costo de operación competitivo. El mismo autor proporciona una definición técnica al describir la automatización como “tecnología basada en la aplicación de complejos sistemas mecánicos, electrónicos y computacionales para la operación y control de la producción”, refiriéndose a la tecnología como los sistemas que integran el sistema de control final. Se puede diferenciar entre aplicaciones de automatización directas e indirectas. Las directas corresponden a sistemas donde el procesador está directamente conectado a las líneas de producción, mientras que las indirectas implican un sistema computacional que actúa como una base de datos alimentada por el proceso, generando datos que luego controlan el mismo.

Con el avance tecnológico, los sistemas de control han evolucionado, volviéndose más complejos y aumentando la capacidad de cómputo y la seguridad. Hoy en día, es posible integrar plantas completas, enviar datos a la nube, usar sistemas expertos, integrar inteligencia artificial para la toma de

decisiones, e incluso acceder a estos datos desde dispositivos móviles. Las herramientas e interfaces en los sistemas de control también se actualizan continuamente.

Algunas de las principales ventajas de la automatización industrial incluyen:

- **Productividad:** Incremento en la productividad gracias a la reducción del error humano, el uso eficiente de maquinaria, mano de obra y materiales.
- **Calidad:** El uso de maquinaria especializada y precisa mejora la calidad del producto final, alineándose con las altas exigencias del consumidor.
- **Eliminación del error humano:** La automatización reduce la intervención humana en la producción, lo cual disminuye los riesgos para la seguridad y evita errores en la línea de producción, que son las principales causas de eventos adversos.
- **Eficiencia en el manejo de materiales:** La automatización agiliza el manejo de materiales, ya que una gran parte del tiempo de fabricación se dedica a estas tareas.

3.4.2.2 Desarrollo de la automatización industrial en la industria minera

La automatización industrial ha generado una transformación progresiva en la industria minera, contribuyendo a la mejora de la seguridad, eficiencia y productividad de las operaciones. La incorporación de equipos y sistemas automatizados ha permitido reducir la exposición del personal a tareas peligrosas y repetitivas, minimizando los riesgos laborales y mejorando las condiciones de trabajo. Asimismo, la automatización posibilita la operación continua de los procesos mineros, como ocurre en el caso de los sistemas de transporte automatizado y los vehículos autónomos, lo que se traduce en un

incremento de la productividad y una mayor estabilidad operativa. La digitalización de los procesos y el monitoreo remoto desempeñan un papel fundamental, ya que permiten supervisar las variables críticas de operación mediante sensores industriales y sistemas de adquisición de datos en tiempo real. No obstante, uno de los principales desafíos asociados a la automatización en minería es la capacitación del personal, dado que la adopción de nuevas tecnologías exige competencias técnicas acordes a los sistemas automatizados implementados. Paralelamente, el sector minero se ve obligado a adaptarse a los avances tecnológicos globales para enfrentar la volatilidad de los precios de los minerales, la reducción del capital disponible y el incremento de los costos operativos. En este contexto, la automatización se ha consolidado como una herramienta estratégica para optimizar los procesos productivos, mejorar la eficiencia operativa y reducir costos. A largo plazo, la minería avanza hacia un modelo más integrado, seguro, eficiente y sostenible, donde la interconexión de sistemas y la comunicación entre diferentes dispositivos permiten obtener una visión global de las operaciones, desde la extracción hasta el despacho del mineral.

3.4.2.3 Medidor de nivel tipo radar

El sistema de medición con ondas electromagnéticas tipo radar utiliza ondas de alta frecuencia, generalmente en el orden de los GHz, emitidas continuamente. Para la determinación de la distancia se calcula el “tiempo de vuelo” de la onda, es decir la medida del tiempo que se tarda la onda en regresar desde el momento que fue emitida. Para lograr esto se utiliza una técnica llamada FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave - Onda continua modulada en frecuencia). La diferencia de frecuencia entre la onda emitida y eco recibido dividido entre la velocidad de la variación de la frecuencia (dato conocido) aporta un dato de tiempo que, reemplazado en la ecuación del movimiento rectilíneo, considerando “c” como la velocidad de propagación de la onda, nos da la distancia (ver figura 2).

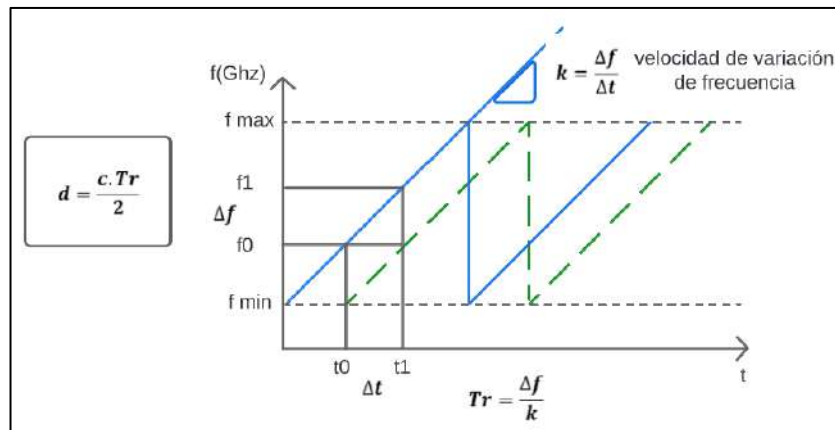


Figura 2: **Determinación de la distancia de un sistema de radar FMCW.**
Fuente: Instrumentación Industrial – Antonio Creus (2010)

De acuerdo con la velocidad de propagación de una onda electromagnética en cualquier medio.

$$v = \frac{c}{\sqrt{K}}$$

Siendo “K” la constante dieléctrica del medio de propagación. Considerando que la constante dieléctrica del aire, vapor o gas sobre el líquido se aproxima a la unidad podemos decir que la variación de la velocidad es despreciable. En el caso de que se mida el nivel de líquidos diríamos que la espuma no sería un problema a la hora de medir, en cambio se debería tener cuidado con la constante dieléctrica del líquido en sí, pudiendo disminuir notablemente la potencia de la onda reflejada si esta constante es baja.

Entre las ventajas del uso de transmisores de nivel radar tenemos:

- Exactitud en general +5 mm.
- Medición continua.
- Variaciones de temperatura y presión no afectan la lectura.
- Medición confiable para sólidos. Medición en ambientes con polución.

3.4.2.4 Controlador Lógico Programable (PLC)

El Controlador Lógico Programable (PLC) es un dispositivo electrónico basado en microprocesadores diseñado para la automatización de procesos

industriales. Su función principal es recibir señales de entrada provenientes de sensores y dispositivos, procesarlas de acuerdo con un programa almacenado y generar señales de salida para controlar actuadores, relés, válvulas u otros elementos de campo. Estos dispositivos están concebidos para operar en entornos industriales adversos, soportando interferencias electromagnéticas, vibraciones, humedad y temperaturas extremas, lo que les garantiza una alta fiabilidad y resistencia operativa prolongada sin necesidad de calibraciones frecuentes. Los PLC se programan conforme a la norma IEC 61131-3, utilizando lenguajes como diagrama de escalera (Ladder Diagram), texto estructurado (Structured Text) o diagrama de bloques funcionales (Function Block Diagram), lo que permite implementar lógicas de control complejas y reconfigurarlas sin necesidad de modificar hardware. En el contexto de la industria minera, permiten ejecutar lógicas de control que aseguran la precisión de los procesos de dosificación y llenado. En el caso de este proyecto se optó por utilizar la gama de Siemens, como lo es el PLC S7-1200 (ver figura 3).

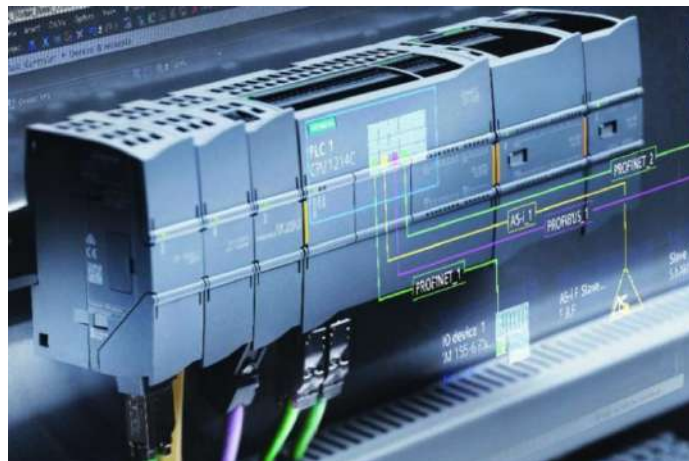


Figura 3: **PLC S7-1200 y módulos.** Fuente: Pagina web SIEMENS

3.4.2.5 Interfaz Hombre–Máquina (HMI)

La Interfaz Hombre–Máquina (HMI), conocida en inglés como Human-Machine Interface, es el medio por el cual un operador humano se comunica con un sistema automatizado, permitiendo supervisar, controlar y visualizar variables del proceso en tiempo real. Estos dispositivos suelen presentarse

como paneles o pantallas táctiles (ver figura 4) que muestran información procesada desde controladores como PLCs y sistemas de supervisión.

En el ámbito industrial, las HMI permiten al personal visualizar el estado de variables críticas, modificar parámetros operativos, iniciar o detener procesos, y gestionar alarmas y notificaciones, constituyéndose en un componente esencial para la operación segura y eficiente de sistemas automatizados.

Las HMI modernas ofrecen interfaces gráficas intuitivas que facilitan la interpretación de datos complejos, tales como perfiles de carga, niveles, pesos o tiempos de ciclo, lo que contribuye a una mejor toma de decisiones por parte del operador y a una mayor eficiencia operativa.

Además, las HMI pueden integrarse con redes industriales y sistemas SCADA, permitiendo la monitorización remota y la gestión centralizada de procesos, lo que es especialmente útil en aplicaciones donde se requiere supervisión continua y respuesta rápida ante eventos del sistema automatizado.



Figura 4: **SIMATIC HMI COMFORT PANELS**. Fuente: Pagina web SIEMENS

3.5 Procedimiento

3.5.1 Ubicación de los puntos de instalación

En el área de planta 2 ubicada en la unidad Mina se ubica el sistema de separación en seco (Dry Cobbing) que consta de 4 áreas bajo supervisión y operación:

- Tolva de material estéril – Area 100

- Cabina de operador de DryCobbing – Area 200
- Faja 3011 – Area 300
- Cabina de operador de Planta 2 – Area 400

Se determina la ubicación de los elementos del sistema de acuerdo con la disponibilidad de control del operador, siguiendo esta pauta cada panel HMI y tablero estará ubicado en una caseta de operación. En la figura 5 se puede observar la disposición geográfica de los lugares de control. Es importante considerar la ubicación de las áreas pues es necesario contar con línea de vista directa entre los puntos para el montaje de las antenas de radio enlace, cada antena estará alimentada y conectada al tablero de control respectivo de la caseta.



Figura 5: **Ubicación de los puntos de instalación.** Fuente: Elaboración propia (2025)

La Figura 6 muestra el esquema general de las áreas de operación involucradas en el proceso. El proceso se inicia en el Área 400, donde se ubica la cabina del operador de Planta 2; en esta área se realiza el chancado primario y la alimentación del mineral, proceso que ya cuenta con un sistema de automatización existente. Desde esta zona, el material chancado es transportado mediante la faja transportadora 3011 – Área 300, donde se encuentran los chutes de derivación que permiten dirigir el material hacia el sistema de Dry Cobbing o hacia el área de apilamiento mediante la faja móvil.

Posteriormente, el material es conducido al sistema de Dry Cobbing – Área 200, donde se lleva a cabo la separación del material de interés y del material estéril. Finalmente, el material estéril separado es transportado hacia la tolva de material estéril – Área 100, en la cual se ejecuta el proceso de llenado de camiones pesados. En esta etapa, el sistema automatizado controla la descarga del material, asegurando un llenado seguro y eficiente de los camiones, operación que puede ser supervisada desde los distintos puntos de control del sistema.

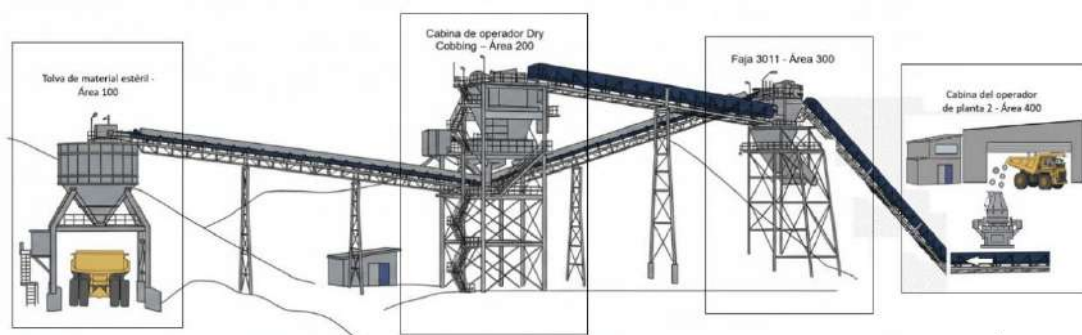


Figura 6: **Esquema general de las áreas de operación.** Fuente: Elaboración propia (2025)

3.5.1.1 Tolva de material estéril – Área 100

La Figura 7 muestra la tolva de material estéril, la cual recibe el producto descartado del proceso de separación en seco, proveniente de la faja de descarga de las poleas magnéticas. Este material es posteriormente descargado en camiones de acarreo pesado, los cuales lo transportan hacia las canchas de desmonte para su disposición final.

Por su parte, la Figura 8 presenta los controles existentes en el área de la tolva de material estéril antes de la implementación del proyecto. En dicha condición, el accionamiento de la compuerta de descarga, semáforo y llenado de tolva era realizado de forma manual por el operador, lo que implicaba una operación dependiente de la intervención directa del personal.



Figura 7: **Tolva de material estéril.** Fuente: Elaboración propia (2025)



Figura 8: **Controles existentes en el área 100.** Fuente: Elaboración propia (2025)

3.5.1.2 Cabina de operador Dry Cobbing – Área 200

La cabina del operador del sistema de separación en seco (Dry Cobbing) se encuentra ubicada en la torre de fajas de Dry Cobbing (ver figura 9). En esta cabina se concentran los instrumentos de monitoreo y las botoneras de accionamiento correspondientes a las fajas transportadoras y a las poleas magnéticas, los cuales se presentan en la Figura 10. Como se aprecia, el

control del sistema se realiza mediante pulsadores y displays analógicos, los cuales no cuentan con funcionalidades avanzadas de control ni de supervisión. En esta área, el operador se encarga de monitorear las corrientes de los motores y de ejecutar manualmente la secuencia de arranque y parada de las fajas del circuito de separación en seco, es decir que éste es punto principal de operación del sistema Dry Cobbing.

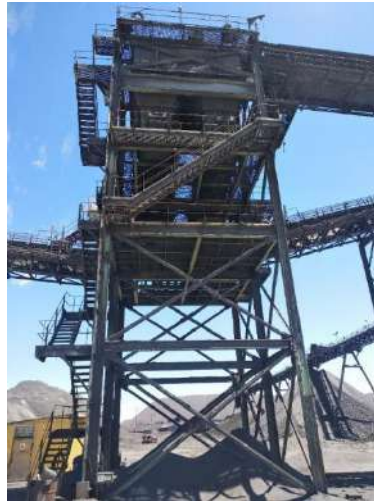


Figura 9: **Torre de fajas DryCobbing.** Fuente: Elaboración propia (2025).



Figura 10: **Controles existentes en el área 200.** Fuente: Elaboración propia (2025).

3.5.1.3 Faja 3011 – Área 300

La Figura 11 muestra la faja 3011, la cual corresponde a una faja apiladora móvil cuya función es apilar rocas con alta concentración de magnetita (Fe_2O_3) en canchas de almacenamiento numeradas. Debajo de cada stockpile

se dispone de un chute de descarga, el cual permite transportar el mineral hacia la siguiente etapa del proceso productivo, ubicada en otra área de la mina que no forma parte del alcance del presente trabajo.

En esta área se cuenta con un operador permanente, encargado de verificar el estado de los polines y accionar el desplazamiento de la faja apiladora móvil de acuerdo con los criterios establecidos por el área de operaciones. Cabe mencionar que, previo a la implementación del proyecto, esta área no contaba con elementos de control ni de supervisión, realizándose la operación de manera completamente manual.



Figura 11: **Faja 3011**. Fuente: Elaboración propia (2025)

3.5.1.4 Cabina operador Planta 2 – Área 400

La Figura 12 muestra la cabina del operador de Planta 2, donde se encuentra instalado el cliente SCADA del sistema de chancado primario, el cual existía previamente al desarrollo del presente proyecto y estaba destinado

exclusivamente a la supervisión y control del proceso de chancado. Desde este cliente SCADA es posible accionar los elementos de la chancadora cónica, monitorear las variables propias del sistema de chancado y controlar el proceso de descarga de los camiones pesados de acarreo provenientes del tajo.

El sistema de chancado primario se encuentra completamente integrado al SCADA SIMATIC WinCC V7 mediante controladores Siemens S7-300, utilizando el protocolo S7 sobre Ethernet industrial. Adicionalmente, en la cabina del operador se dispone de un sistema de videovigilancia (CCTV) con cámaras instaladas en puntos estratégicos de la planta, las cuales permiten una supervisión visual continua del proceso. En el marco del presente proyecto, se considera la integración del sistema de separación en seco (Dry Cobbing) a la red industrial existente de Planta 2, aprovechando la infraestructura del SCADA ya implementado. El alcance del trabajo contempla la preparación e integración de las señales de campo, estados, alarmas y variables de proceso del sistema de Dry Cobbing y del llenado de camiones pesados, de manera que queden disponibles para el desarrollo de pantallas gráficas de monitoreo y accionamiento dentro del SCADA existente. De esta forma, el proyecto sienta las bases para una supervisión centralizada e integrada del proceso, sin modificar la arquitectura principal del sistema SCADA previamente implementado.



Figura 12: **Cabina de operador planta 2.** Fuente: Elaboración propia (2025)

3.5.2 Elección de los equipos del sistema de control

3.5.2.1 Elección del Controlador

Para la selección del controlador se toman los siguientes criterios:

- Compatibilidad con el sistema existente.
- Protocolo de comunicación compatible.
- Capacidad de memoria y procesamiento.
- Cantidad de I/Os suficientes para el correcto funcionamiento del sistema.

Para este caso se requiere un controlador de fácil intervención para el personal de mantenimiento, con un nivel de procesamiento medio, modular y con protocolo de comunicación compatible con el sistema de control central de planta 2. Para ello se seleccionó el controlador S7-1200 1212C que cumple con las mencionadas características.

3.5.2.2 Elección del HMI

Para la selección del HMI se toman los siguientes criterios:

- Características físicas; tamaño y durabilidad adecuadas.
- Capacidad de comunicación con autómatas mediante protocolo S7.
- Capacidad de memoria expandible.
- Capacidad de almacenar históricos.
- Capacidad de admitir más de una conexión.

De acuerdo con esto se selecciona el panel de operador SIMATIC HMI KP1500 Comfort de 15" que cumple con las condiciones antes mencionadas. Se instalará paneles de operador en las áreas 200, 300 y 400.

3.5.2.3 Elección de cámaras y NVR

Debido a las condiciones ambientales, las cámaras deben tener un alto grado de protección frente a ingreso de partículas. Deben poder captar imágenes de noche y aceptar el protocolo IPv4 para el acceso mediante web server y NVR. Tomando en cuenta estas consideraciones se selecciona el modelo AXIS M2025-LE que cuenta con protocolo IPv4, filtro infrarrojo y grado de protección IP66. En el caso de NVR se selecciona el modelo DS-7104NI-E1/4P HIKVISION que tiene 6 TB de capacidad de memoria, 4 canales, acceso ethernet y salida HDMI para conexión a monitor.

3.5.2.4 Elección de elementos de comunicación

Para la elección de los elementos de comunicación se tiene en cuenta los siguientes requerimientos:

- Topología del enlace: Anillo
- Tiempo de restablecimiento de anillo: menor a 30ms.
- Configuración de VLAN's gestión inteligente de paquetes de datos.
- Ancho de banda del enlace: 50Mbps.
- Frecuencia del enlace: 2.4GHz.
- Seguridad en puertos: por MAC.
- Confiabilidad del enlace: Alta.

De acuerdo con las especificaciones es necesario contar con switchs administrables. Se opta por emplear los switch NTRON 716-TX que poseen 16 puertos, contacto eléctrico de falla, montado en riel DIN, tecnología N-RING con restablecimiento menor a 30 ms, configuración por web server y Port QoS.

Para el caso de las antenas se selecciona el modelo Radwin 2000, con 50 Mbps de ancho de banda, operación en bandas 3.4-3.8/4.9-6.0 GHz, distancia

de enlaces de hasta 120 Km, grado de protección IP66 y configuración por web server.

3.5.3 Elección de los instrumentos

3.5.3.1 Elección de los transmisores de nivel

Se tiene en consideración los siguientes criterios para la selección de los transmisores de nivel.

- Material para censar: Sólidos a granel, rocas de 4-5"
- Medición continua y precisión.
- Trabajo en condiciones de polución.
- Acceso a configuración remota.
- Salida de 4-20 mA con Hart para futuras integraciones.

De acuerdo con las consideraciones anteriormente expuestas, se seleccionó un transmisor de nivel tipo radar modelo VEGAPULS 69, el cual se muestra en la Figura 13. Este equipo fue elegido debido a su alta precisión y capacidad de medición continua, características propias de los transmisores radar. El modelo VEGAPULS 69 está diseñado específicamente para la medición de sólidos a granel y permite su configuración mediante comunicación Bluetooth, facilitando las tareas de ajuste y puesta en marcha.

Los transmisores de nivel tipo radar presentan un desempeño confiable en ambientes con presencia de polvo y polución, condiciones típicas de la operación minera. Adicionalmente, el equipo cuenta con grado de protección IP66, un ángulo de apertura del haz de 3,5° y opera en la banda W (75–85 GHz), lo que permite una medición precisa incluso en espacios reducidos y con superficies irregulares del material.



Figura 13: **Transmisor de nivel tipo radar.** Fuente: Manual Vega Puls 69

3.5.3.2 Elección de los sensores de posición

Los sensores de posición detectaran la presencia del camión pesado. Se selecciona un instrumento emisor de barrera de microondas y su respectivo receptor. Algunas ventajas de este tipo de instrumentos son:

- Área de detección mayor.
- Detección sin contacto.
- Usado para aplicaciones de detección de sólidos, incluso en movimiento

Se optó por utilizar el emisor VEGAMIP T61 y su correspondiente receptor VEGAMIP R61, los cuales se muestran en la Figura 14. Estos dispositivos fueron seleccionados debido a que permiten la configuración directa en campo, incluyendo el ajuste de la potencia de emisión y la configuración del umbral de conteo para la detección, lo que facilita su adaptación a las condiciones específicas del proceso y mejora la confiabilidad de la medición.

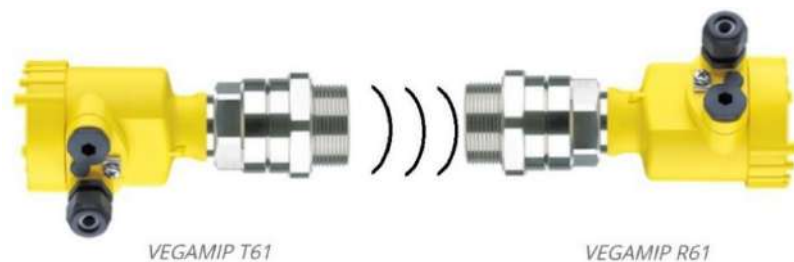


Figura 14: **Sensores de posición transmisor y receptor.** Fuente: Página Web VEGA.

3.5.4 Ubicación y consideraciones para los tableros de control

Los tableros de control constituyen las estructuras que alojan los elementos físicos del sistema de control, tales como dispositivos de protección, control y comunicación. Su adecuado dimensionamiento es fundamental y debe realizarse considerando criterios como la finalidad del sistema, la seguridad eléctrica, la correcta selección de protecciones, la posibilidad de ampliaciones futuras y el espacio interno disponible para un montaje ordenado y seguro.

Dado que las áreas donde se instalarán los tableros presentan un ambiente con alta presencia de polución, especialmente partículas de hierro, resulta indispensable contar con un alto grado de protección que evite el ingreso de contaminantes a la circuitería interna, los cuales podrían afectar el funcionamiento de los equipos. En este contexto, la norma IEC 60529 establece el código IP para clasificar los grados de protección de los envoltentes. Para el presente proyecto, se seleccionaron tableros con grado de protección IP66, adecuados para operar en condiciones ambientales severas.

En el Cuadro 1 se presenta la información correspondiente a los tableros de control utilizados para la implementación del sistema automático de llenado de camiones pesados y el control del proceso de separación en seco. Los tags de identificación de cada tablero han sido definidos en función del área donde se encuentran ubicados, siguiendo los criterios de nomenclatura establecidos para el proyecto.

Cuadro 1 Ubicación y etiquetas de tableros del sistema.

TAG	Servicio	Ubicación	Área
100-CP-001	Tablero de control del Sistema de tolva.	Sistema de tolva	100
200-CP-001	Tablero de control de la Cabina de operador Dry Cobbing.	Cabina de operador Dry Cobbing	200
300-CP-001	Tablero de control de la Cabina de operador faja 3011.	Cabina de operador faja 3011	300

400-CP-001	Tablero de control de la Cabina de operador planta 2.	Cabina de operador planta 2	400
------------	--	--------------------------------	-----

Fuente: Elaboración propia

3.5.5 Montaje y ubicación de equipos

3.5.5.1 Montaje y ubicación de antenas

Para el montaje de las antenas se empleará una estructura metálica prefabricada, la cual será soldada al grating del área correspondiente. La ubicación de las antenas se definirá considerando la existencia de línea de vista directa entre los dispositivos que conforman el anillo de comunicación, con el fin de garantizar una transmisión confiable y estable de la señal.

3.5.5.2 Montaje y ubicación de instrumentos

Los instrumentos de medición estarán ubicados en el Área 100. Los transmisores de nivel se instalarán utilizando el accesorio de montaje provisto por el fabricante, el cual facilita el ajuste del ángulo de inclinación. Dicho accesorio será soldado al grating, en una posición elevada sobre el área donde los camiones se estacionan para el llenado de material estéril.

El ángulo de inclinación de montaje, mostrado en la Figura 15, se define de manera que el sensor quede orientado perpendicularmente a la superficie de la tolva del camión, asegurando una medición confiable del nivel y evitando la pérdida de ecos o la generación de lecturas falsas durante el proceso de llenado.



Figura 15: **Posición de montaje instrumentos.** Fuente: Elaboración propia (2025).

3.6 Resultado de la actividad

3.6.1 Arquitectura del sistema de control

El sistema automático de llenado de camiones pesados será monitoreado y controlado de forma remota mediante pantallas HMI KP1500 Comfort, ubicadas en las áreas 200, 300 y 400, e instaladas en los tableros 200-CP-001, 300-CP-001 y 400-CP-001, respectivamente. Estos HMI permiten la interacción directa con la lógica de control implementada en el PLC10001, correspondiente a un controlador Siemens S7-1200, el cual ejecuta la secuencia de control del proceso propuesto. La comunicación entre el PLC y los HMI se realiza mediante el protocolo S7 sobre Ethernet industrial.

El PLC10001 constituye el controlador central implementado para el sistema automático de llenado de camiones pesados y el control del proceso de separación en seco (Dry Cobbing). Este equipo se encuentra instalado en el gabinete de control 100-CP-001, ubicado en el Área 100, y se integra a la red de control existente correspondiente al sistema de chancado primario ya existente. Para la obtención de señales de monitoreo y control del proceso de separación en seco, el PLC10001 establece comunicación con el PLC UC10001 Siemens S7-300, el cual forma parte del SCADA existente del chancado primario y concentra las señales de campo del sistema Dry Cobbing. Estas señales serán utilizadas para el control desde los nuevos HMI

implementados en el presente proyecto, permitiendo una integración funcional entre ambos sistemas.

Todos los equipos correspondientes a la nueva implementación se integran a la red de control industrial existente de chancado primario, garantizando la interoperabilidad con el sistema SCADA previamente instalado. Para el monitoreo visual del llenado de los camiones volquete, se implementa una subred CCTV, compuesta por cámaras IP y un NVR, destinada exclusivamente a la supervisión del proceso.

Finalmente, por requerimiento del cliente, la infraestructura de comunicación del proyecto se implementa mediante radioenlace, conformando una topología en anillo, para lo cual se dispone de dos antenas en cada área involucrada.

En el Cuadro 2 se detallan los equipos considerados en el presente proyecto de implementación.

Cuadro 2 Equipos de red de control y CCTV.

Área	Equipo	Tag	Tipo	Subred	Dirección IP
100	PLC Sistema Tolva	PLC10001	PLC	Control	192.168.5.10
100	PLC S7-300 Existente	UC10001	PLC	Control	192.168.5.99
100	Switch Industrial	SW10001	Switch	Control	192.168.5.11
100	Antena de Radio Enlace	RF10001	Radio	Control	192.168.5.12
100	Antena de Radio Enlace	RF10002	Radio	Control	192.168.5.13
200	Switch Industrial	SW20001	Switch	Control	192.168.5.20
200	Antena de Radio Enlace	RF20001	Radio	Control	192.168.5.21
200	Antena de Radio Enlace	RF20002	Radio	Control	192.168.5.22
200	HMI Operador	HMI20001	HMI	Control	192.168.5.23
300	Switch Industrial	SW30001	Switch	Control	192.168.5.30
300	Antena de Radio Enlace	RF30001	Radio	Control	192.168.5.31
300	Antena de Radio Enlace	RF30002	Radio	Control	192.168.5.32
300	HMI Operador	HMI30001	HMI	Control	192.168.5.33
400	Switch Industrial	SW40001	Switch	Control	192.168.5.40
400	Antena de Radio Enlace	RF40001	Radio	Control	192.168.5.41
400	Antena de Radio Enlace	RF40002	Radio	Control	192.168.5.42

400	HMI Operador	HMI40001	HMI	Control	192.168.5.43
400	Servidor SCADA Existente	SCADA	Servidor	Control	192.168.5.77
100	Cámara IP	CM10001	Cámara	CCTV	192.168.10.10
100	Cámara IP	CM10002	Cámara	CCTV	192.168.10.11
400	NVR CCTV	NVR40001	NVR	CCTV	192.168.10.20

Fuente: Elaboración propia

A continuación, en la figura 16 se muestra el diagrama de red para los equipos mencionados:

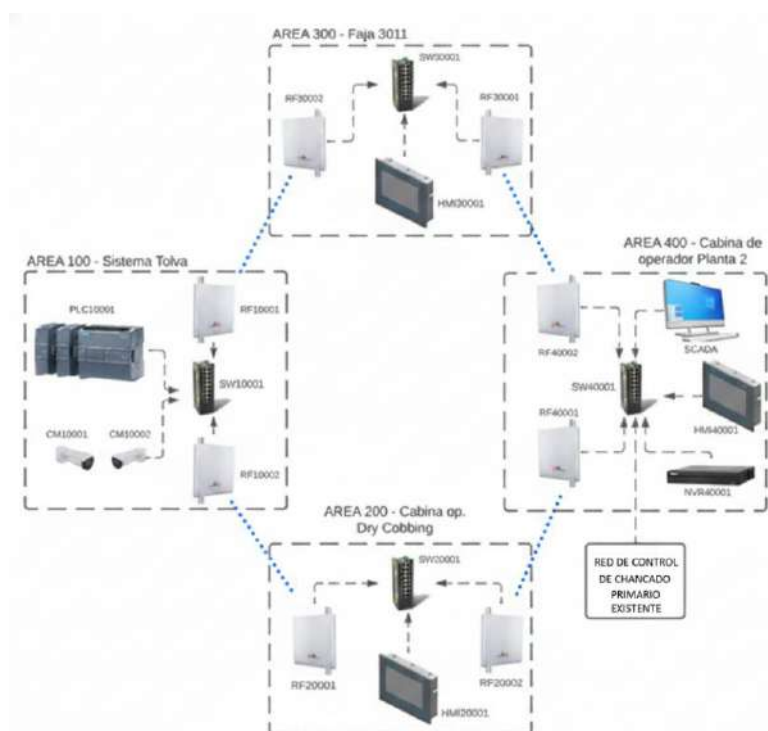


Figura 16: **Diagrama de arquitectura de control.** Fuente: Elaboración propia (2025).

3.6.2 Señales de control y monitoreo

3.6.2.1 Señales de control discretas cableadas

En el Cuadro 3 se presentan las señales discretas de entrada y salida utilizadas por el sistema. Dichas señales se encuentran cableadas al controlador PLC10001 ubicado en el gabinete 100-CP-001, a través de los módulos de entrada y salida correspondientes, instalados en el Área 100.

Cuadro 3 Señales discretas en el controlador principal.

UBICACIÓN: ÁREA 100		
GABINETE: 100-CP-001		
MÓDULO: DI01 - ENTRADA DIGITAL		
TAG	Descripción	Servicio
ZS10001	Límite de carrera.	Estado de apertura de la compuerta de la tolva de desmonte.
ZS10002	Límite de carrera.	Estado de cierre de la compuerta de la tolva de desmonte.
ZES10001	Detector de posición.	Estado del detector de posición - lado frontal.
ZES10002	Detector de posición.	Estado del detector de posición - lado posterior.
KM1A	Contacto seco.	Estado de la bomba hidráulica del tablero local.
HS01A	Interruptor manual.	Estado del selector en remoto del tablero local.
PE01A	Parada de emergencia.	Estado del interruptor de parada de emergencia del tablero local.
MÓDULO: DO01 - SALIDA DIGITAL		
XY10001	Solenoides.	Comando de apertura de la compuerta de la tolva de desmonte.
XY10002	Solenoides.	Comando de cierre de la compuerta de la tolva de desmonte.
XY10003	Solenoides.	Comando de arranque o parada de la bomba Hidráulica.
UL10001	Indicador.	Comando del semáforo verde.
UL10002	Indicador.	Comando del semáforo rojo.
XA10001	Alarma sonora.	Alarma sonora de falla general.

Fuente: Elaboración propia

3.6.2.2 Señales de control análogas cableadas

En el Cuadro 4 se presentan las señales analógicas de entrada y salida utilizadas por el sistema. Estas señales se encuentran cableadas al controlador PLC10001 instalado en el gabinete 100-CP-001, a través de los módulos analógicos correspondientes, ubicados en el Área 100.

Cuadro 4 Señales análogas en el controlador principal

UBICACIÓN: ÁREA 100		
GABINETE: 100-CP-001		
MÓDULO: AI01 – ENTRADA ANALÓGICA		
TAG	Descripción	Servicio
LIT10001	Transmisor indicador de nivel.	Medición de nivel de la tolva de material estéril.
LIT10002	Transmisor indicador de nivel.	Medición de nivel del camión - lado izquierdo.
LIT10003	Transmisor indicador de nivel.	Medición de nivel del camión - lado derecho.

MÓDULO: AO01 – SALIDA ANALÓGICA

LI10001A	Indicador de nivel.	Indicador de nivel de la tolva de desmonte (va a indicador local en caseta de control tolva)
-----------------	---------------------	--

Fuente: Elaboración propia

3.6.2.3 Señales de monitoreo y control comunicadas

En el Cuadro 5 se presentan las señales para el control del sistema de separación en seco (Dry Cobbing), las cuales se obtienen mediante el enlace de comunicación S7 con el PLC UC10001 existente. Estas señales permiten la supervisión del estado operativo de los equipos involucrados en el proceso. Las señales de control se emplean para el arranque y la parada de las poleas magnéticas y fajas transportadoras, y corresponden a los comandos de arranque y paro disponibles en las pantallas HMI. Dichas señales fueron incorporadas a la lógica del PLC UC10001 permitiendo una integración funcional y coordinada entre ambos sistemas de control.

Cuadro 5 Señales de monitoreo y control DryCobbing.

UBICACION: GABINETE EXISTENTE DE CONTROL	
POR COMUNICACIÓN CON PLC S7-300	
SEÑALES DE MONITOREO (SOLO LECTURA)	
TAG	Servicio
FDC1	Estado de motor arrancado/parado de faja transportadora 1.
FDC2	Estado de motor arrancado/parado de faja transportadora 2.
FDC3	Estado de motor arrancado/parado de faja transportadora 3.
FDC4	Estado de motor arrancado/parado de faja transportadora 4.
FDC5	Estado de motor arrancado/parado de faja transportadora 5.
PO2	Estado de encendido de polea magnética 2.
PO3	Estado de encendido de polea magnética 3.
FDC1_I	Corriente actual de motor de faja transportadora 1.
FDC2_I	Corriente actual de motor de faja transportadora 2.
FDC3_I	Corriente actual de motor de faja transportadora 3.
FDC4_I	Corriente actual de motor de faja transportadora 4.
FDC5_I	Corriente actual de motor de faja transportadora 5.
FDC1_INTLCK	Enclavamiento activo de motor de faja transportadora 1.
FDC2_INTLCK	Enclavamiento activo de motor de faja transportadora 2.
FDC3_INTLCK	Enclavamiento activo de motor de faja transportadora 3.
FDC4_INTLCK	Enclavamiento activo de motor de faja transportadora 4.
FDC5_INTLCK	Enclavamiento activo de motor de faja transportadora 5.
FDC1_PERM	Permisivo activo de motor de faja transportadora 1.

FDC2_PERM	Permisivo activo de motor de faja transportadora 2.
FDC3_PERM	Permisivo activo de motor de faja transportadora 3.
FDC4_PERM	Permisivo activo de motor de faja transportadora 4.
FDC5_PERM	Permisivo activo de motor de faja transportadora 5.
PO2_I	Corriente en polea de faja transportadora 2.
PO3_I	Corriente en polea de faja transportadora 3.
AL_S_HZ	Velocidad de motor alimentador sur.
AL_N_HZ	Velocidad de motor alimentador norte.
AL_S_I	Corriente de motor alimentador sur.
AL_N_I	Corriente de motor alimentador norte.
LI_S	Nivel de tolva de chancadora sur.
LI_N	Nivel de tolva de chancadora norte.
CH_S_I	Corriente de chancadora de cono sur.
CH_N_I	Corriente de chancadora de cono norte.
CH_S_T	Temperatura de aceite chancadora sur.
CH_N_T	Temperatura de aceite chancadora norte.
DRYCOB_ON	Sistema DryCobbing activado
SEÑALES DE CONTROL (LECTURA ESCRITURA)	
TAG	Servicio
FDC1_CMD_ST	Comando de arranque de faja transportadora 1.
FDC2_CMD_ST	Comando de arranque de faja transportadora 2.
FDC3_CMD_ST	Comando de arranque de faja transportadora 3.
FDC4_CMD_ST	Comando de arranque de faja transportadora 4.
FDC5_CMD_ST	Comando de arranque de faja transportadora 5.
FDC1_CMD_SP	Comando de paro de faja transportadora 1.
FDC2_CMD_SP	Comando de paro de faja transportadora 2.
FDC3_CMD_SP	Comando de paro de faja transportadora 3.
FDC4_CMD_SP	Comando de paro de faja transportadora 4.
FDC5_CMD_SP	Comando de paro de faja transportadora 5.
CMD_PO2_I	Referencia de corriente de polea de faja transportadora 2
CMD_PO3_I	Referencia de corriente de polea de faja transportadora 3

Fuente: Elaboración propia

3.6.3 Modos de control

El sistema de control de llenado de camiones tendrá un selector ubicado en el tablero del sistema hidráulico para seleccionar 2 tipos de modo de control: local y remoto. A su vez, el sistema remoto contará con dos modos de control: remoto manual y remoto automático. estos modos de control podrán ser seleccionados desde los paneles HMI y SCADA. En el Cuadro 6 se presenta

un resumen de los modos de control, junto con la descripción de sus principales características y condiciones de operación.

Cuadro 6 Modos de control

Modo de operación	Sistema	Equipos involucrados	Permisivos requeridos	Acciones habilitadas
Local	Sistema de llenado de camiones	Tablero local - Área 100	• Selector HS01A en posición LOCAL • Sin fallas eléctricas	• Encendido/apagado de bomba hidráulica • Apertura y cierre manual de compuerta • Control mediante botoneras locales
Remoto manual	Sistema de llenado de camiones	PLC10001 + HMIs	• Selector HS01A en posición REMOTO • Comunicación PLC-HMI activa • Sin fallas críticas de hardware activas	• Encendido/apagado de bomba hidráulica • Cambio de estado de semáforo • Apertura/cierre de compuerta desde HMI
	Sistema de separación en seco	PLC10001 + UC10001 + HMIs	• Comunicación PLC-HMI activa • Comunicación entre PLCs activa • Sin fallas críticas de hardware activas.	• Arranque/parada de fajas (según permisos)
Remoto automático	Sistema de llenado de camiones	PLC principal + HMIs	• Selector HS01A en posición REMOTO • Comunicación PLC-HMI activa • Sin fallas críticas de hardware activas.	• Ejecución automática de secuencia • Control lógico de actuadores • Supervisión automática del proceso

Fuente: Elaboración propia

3.6.3.1 Modo Local

El sistema de tolva es controlado localmente mediante el tablero local existente, el cual permite la operación directa del sistema en campo.

- **Activación del modo local**

El modo local se habilita mediante un selector de tres posiciones, el cual debe colocarse en la posición LOCAL. Dicho selector se encuentra ubicado en la puerta del tablero local del sistema hidráulico y está identificado con el tag HS01A.

- **Funcionamiento**

El funcionamiento del sistema en modo local mantiene las mismas condiciones operativas previas a la integración del sistema automatizado, con la finalidad de no perder el control del proceso y garantizar un modo de operación alternativo durante labores de mantenimiento del sistema automático. Al activarse este modo, se inhabilitan los modos remoto manual y remoto automático, permitiendo únicamente el control del sistema de forma directa en campo. El control del sistema se realiza mediante botoneras instaladas tanto en el tablero local como en el área de operación, las cuales permiten el encendido y apagado de la bomba hidráulica, así como la apertura y cierre de la compuerta de la tolva de desmonte para el llenado de los camiones volquete. Este control se ejecuta a través de un arreglo de relés y botoneras ubicados en el área 100. La activación y ejecución del control local solo puede realizarse desde dicha área; sin embargo, el monitoreo del estado general del sistema continúa siendo posible a través de las pantallas HMI integradas al sistema.

3.6.3.2 Modo Remoto

En el modo remoto, el sistema de tolva es controlado a través de las interfaces hombre-máquina (HMI) instaladas en la cabina de operador de planta 2, la cabina de operador de Dry Cobbing y la cabina de operador de la faja 3011. Este modo de operación permite el control integrado del sistema de tolva y del sistema Dry Cobbing.

- **Activación del modo remoto**

El modo remoto del sistema se habilita mediante el selector de tres posiciones, ubicándolo en la posición REMOTO. Dicho selector se encuentra instalado en la puerta del tablero local del sistema hidráulico y está identificado con el tag HS01A.

- **Funcionamiento**

El funcionamiento en modo remoto habilita la activación de las salidas desde el controlador de campo. En este modo, el controlador evalúa las condiciones de las señales de entrada provenientes de los sensores y dispositivos de campo, y genera las correspondientes respuestas en las salidas, las cuales son ejecutadas por los actuadores del sistema.

Asimismo, en modo remoto es posible monitorear y controlar todo el proceso a través de las pantallas HMI integradas a la red de automatización. Dentro de este modo se definen dos submodos de control:

- **Modo remoto manual**, en el cual el operador realiza un control directo de las salidas del sistema desde las pantallas HMI, sin intervención de la lógica automática.
- **Modo remoto automático**, en el cual el control del sistema se ejecuta de acuerdo con la lógica programada en el controlador, permitiendo una operación secuencial y automática del proceso, alineada a las condiciones operativas definidas.

3.6.4 Filosofía de control

El sistema de control ha sido diseñado para operar tanto en modo remoto como en modo local, con el objetivo de garantizar flexibilidad operativa, continuidad del proceso y seguridad durante la operación y el mantenimiento. La operación remota se realiza a través de las interfaces hombre-máquina (HMI) ubicadas en la cabina de operador de planta 2, la cabina de operador

de Dry Cobbing y la cabina de operador de la faja 3011; mientras que la operación local se efectúa desde el tablero local existente del sistema. El sistema permite la selección y visualización de los distintos modos de operación desde los dispositivos HMI. El cambio entre modos de operación solo es posible cuando se cumplen las condiciones necesarias para el modo seleccionado, evitando transiciones no seguras o inconsistencias en el control.

3.6.4.1 Modo Remoto Manual

- **Sistema de llenado de camiones**

El modo remoto manual se selecciona desde la pantalla HMI mediante el botón identificado como “MAN”. En este modo de operación, el sistema permite al operador ejercer un control directo sobre los principales equipos del proceso, sin la intervención de secuencias automáticas. Las acciones habilitadas en este modo incluyen el encendido y apagado de la bomba hidráulica, el cambio del estado del semáforo y cierre de la compuerta de la tolva de desmonte para el llenado de los camiones volquete. Todas estas operaciones pueden ejecutarse desde la interfaz táctil de los HMI y, adicionalmente, desde el sistema SCADA ubicado en la cabina del operador de planta 2. Este modo se utiliza principalmente para maniobras operativas controladas, pruebas funcionales y situaciones que requieran intervención directa del operador.

- **Sistema de separación en seco**

El sistema de fajas no tiene un tablero local para seleccionar remoto o local por lo que por defecto siempre se encontrará en modo remoto. El operador puede ejercer un control directo sobre el arranque y parada de las fajas transportadoras desde las pantallas HMI o, de manera complementaria, desde el sistema SCADA ubicado en la cabina del operador de planta 2. No se

ejecutan secuencias automáticas; sin embargo, el sistema incorpora permisivos lógicos con la finalidad de garantizar una operación segura, ordenada y acorde al flujo del proceso.

Es importante indicar que todos los enclavamientos de los equipos del sistema de separación en seco se encuentran en el PLC UC10001 existente. Por lo tanto, el sistema desarrollado permite la visualización de cuándo un enclavamiento está activo para cada faja, así como el estado del permisivo asociado a cada faja, sin modificar la lógica de protección existente. Esta información se muestra en tiempo real en los HMI.

En el Cuadro 7 se detallan los permisivos para el arranque de fajas del sistema de separación en seco. La faja 4 constituye la última faja del sistema de separación en seco y puede ser arrancada directamente siempre que el sistema Dry Cobbing se encuentre habilitado mediante la señal proveniente del PLC UC10001. Las fajas 2 y 3 solo pueden ser arrancadas si la faja 4 se encuentra en operación, manteniendo así la continuidad del proceso. Por su parte, la faja 1 puede ser arrancada únicamente cuando se encuentre en funcionamiento la faja 2 o la faja 3, y siempre que el sistema Dry Cobbing esté habilitado, permitiendo flexibilidad operativa sin comprometer la seguridad del sistema.

La faja 3011 no presenta permisivos de arranque y puede ser operada de forma independiente. La faja 3009 solo puede ser arrancada cuando la faja 3011 se encuentra en operación, mientras que la faja 3008 requiere que la faja 3009 esté previamente arrancada, asegurando una correcta secuencia aguas arriba del proceso.

Cuadro 7 Permisivos para el arranque manual de fajas

Faja	Condiciones de arranque (permisivos)	Observaciones
Faja 4	• Dry Cobbing habilitado desde UC10001	Última faja del circuito Dry Cobbing. No requiere fajas previas.
Faja 2	• Faja 4 arrancada	Depende de la faja final del circuito.

	• Dry Cobbing habilitado desde UC10001	
Faja 3	• Faja 4 arrancada • Dry Cobbing habilitado desde UC10001	Permite continuidad del transporte hacia la tolva.
Faja 1	• Faja 2 o Faja 3 arrancada • Dry Cobbing habilitado desde UC10001	Permite flexibilidad operativa dentro del circuito Dry Cobbing.
Faja 3009	• Faja 3011 arrancada	Alimenta al circuito Dry Cobbing.
Faja 3008	• Faja 3009 arrancada	Secuencia aguas arriba del circuito general.
Faja 3011		Faja independiente, sin permisivos de arranque.

Fuente: Elaboración propia

3.6.4.2 Modo Remoto Automático

El modo remoto automático ejecuta una secuencia de operación previamente programada en el controlador, la cual se desarrolla de manera ordenada y supervisada. Durante esta secuencia, el sistema evalúa continuamente el estado de las señales de entrada y verifica el cumplimiento de las condiciones establecidas, determinando en función de ello el estado de las salidas y la activación de los actuadores correspondientes. Ante cualquier desviación de las condiciones normales de operación, el sistema genera alarmas visibles en los HMI para alertar al operador. En caso de que las desviaciones representen un riesgo para la seguridad del personal o la integridad de los equipos, el sistema ejecuta enclavamientos de protección, deteniendo o bloqueando los equipos involucrados. El modo remoto automático opera bajo un esquema de permisivos, los cuales deben cumplirse de manera simultánea para permitir el inicio y la continuidad de la secuencia automática.

- **Sistema de Llenado de camiones automático**

El sistema de llenado automático de camiones se ejecuta dentro del modo remoto automático, siempre que se cumplan todas las condiciones iniciales establecidas. En caso de que existan alarmas activas, el sistema permite realizar un reinicio de alarmas previo al inicio de la secuencia automática, siempre que las condiciones de seguridad lo permitan.

Los permisos requeridos para iniciar el modo automático del sistema automático de llenado de camiones son los siguientes:

- Dry Cobbing en operación (señal proveniente de UC10001 existente).
- Chute de descarga de la faja 3009 disponible (señal proveniente de UC10001 existente).
- Selector del tablero local HS01A en posición REMOTO.
- Ausencia de objetos bajo la tolva (sensores ZES10001 y ZES10002 desactivados).
- Compuerta de la tolva en posición cerrada (sensor ZS10001 desactivado y ZS10002 activado).
- Bomba hidráulica KM01A desactivada.
- Ausencia de fallas activas en el sistema.

El cumplimiento de estos permisos garantiza una operación segura, controlada y eficiente del sistema de llenado automático, reduciendo riesgos operativos y asegurando la correcta ejecución de la secuencia de llenado de los camiones volquete.

La Figura 17 muestra el diagrama de flujo del modo remoto automático que ilustra la secuencia lógica del sistema de llenado de camiones pesados, para la operación segura y controlada del proceso. El diagrama contempla la verificación de permisos iniciales, la detección y validación del camión de acarreo, el control del proceso de llenado, así como la gestión de alarmas, enclavamientos y condiciones de salida del camión.

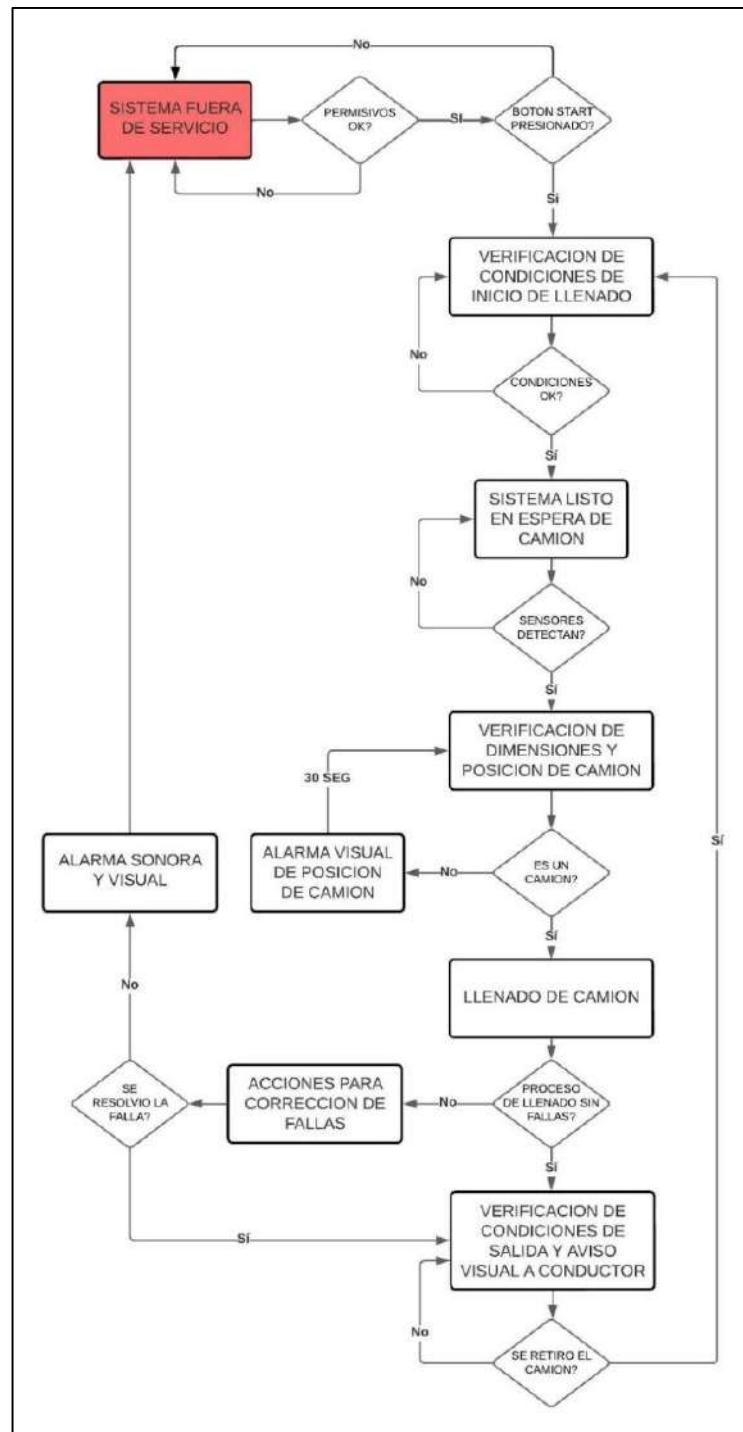


Figura 17: **Diagrama de flujo de control automático de llenado de camiones.** Fuente: Elaboración propia (2025).

Derivado del diagrama de flujo presentado en la figura 17, en el Cuadro 8 se detallan los pasos que conforman la secuencia de llenado automático, junto con la descripción de las acciones y condiciones asociadas a cada paso.

Cuadro 8 Secuencia de llenado automático.

Paso	Descripción	Entradas / Condiciones	Acciones del sistema	Resultados
1	Inicio de la secuencia automática	Pulsación del botón "INICIAR" desde HMI	Temporización inicial de seguridad (5 s)	Secuencia automática preparada
2	Verificación de condiciones iniciales	Estado Dry Cobbing chute disponible, selector remoto activo, sin fallas	Evaluación lógica de condiciones iniciales	Permiso para continuar o bloqueo del sistema
3	Sistema listo y en espera de camión	Sensores ZES10001 y ZES10002	Monitoreo continuo de presencia bajo tolva	Detección de objeto bajo tolva
4	Verificación de dimensiones y posición	Sensores ZES10001, ZES10002, LIT10001 y LIT10002	Análisis para discriminar si el objeto es un camión	Confirmación o rechazo del objeto
5	Alarma por posición incorrecta (si aplica)	Dimensiones/posición no válida	Activación de alarma visual de posición	Aviso al conductor para corrección
6	Confirmación de camión válido	Dimensiones y posición correctas	Autorización para iniciar llenado	Continuación de la secuencia
7	Arranque de bomba hidráulica	Estado KM01A	Encendido de la bomba hidráulica	Presión disponible para accionar compuerta
8	Apertura de compuerta de tolva	Temporización configurable cumplida	Activación del pistón hidráulico	Inicio de descarga de material
9	Llenado automático del camión	Lectura de transmisores de nivel	Monitoreo continuo del nivel de sólidos	Control del llenado
10	Detección de nivel óptimo	Nivel ≥ 90 % de sólidos	Cierre automático de compuerta	Detención de la descarga

11	Confirmación de cierre de compuerta	Sensor inductivo ZS10002	Verificación de cierre correcto	Sistema seguro para salida
12	Aviso de salida al conductor	Estado de compuerta cerrada	Activación de bocina y semáforo	Indicación audible y visual
13	Retiro del camión	Sensores de presencia	Verificación de despeje bajo tolva	Área libre
14	Conteo de camión llenado	Evento de ciclo completo	Incremento del contador de camiones	Registro de producción
15	Retorno a estado inicial	Sistema despejado	Sistema vuelve a espera de camión	Listo para nuevo ciclo

Fuente: Elaboración propia

3.6.4.3 Enclavamientos

Los enclavamientos constituyen condiciones de seguridad que bloquean la operación o fuerzan al sistema a un estado seguro. El Cuadro 9 presenta los enclavamientos considerados para el sistema de llenado automático de camiones pesados. En el caso del sistema de separación en seco (Dry Cobbing), los enclavamientos se encuentran implementados en el PLC UC10001; por tal motivo, los bits de enclavamiento son obtenidos mediante comunicación y almacenados en el bloque de datos DB3 *Intlck_Faults_DC* del PLC10001, el cual se menciona en el Cuadro 11.

Cuadro 9 Lista de enclavamientos del sistema de llenado automático.

Enclavamiento	Descripción
I-001	Falla del procesador o de los módulos AI, DI y DO del PLC del sistema de tolva.
I-002	Falla en la apertura de la compuerta del sistema de tolva.
I-003	Falla en el cierre de la compuerta del sistema de tolva.
I-004	Falla de la bomba hidráulica del sistema de tolva.
I-005	Falla en la medición del nivel de la tolva de material estéril.

I-006	Falla en la medición del nivel del camión – lado izquierdo.
I-007	Falla en la medición del nivel del camión – lado derecho.
I-008	Alarma de nivel Bajo-Bajo en la tolva de material estéril.
I-009	Falla en la detección de salida del camión del sistema de tolva.
I-010	Falla en la detección de posicionamiento del camión en el sistema de tolva.
I-011	Alarma de nivel Alto-Alto del camión – lado izquierdo.
I-012	Alarma de nivel Alto-Alto del camión – lado derecho.
I-013	Falla general del sistema de tolva.

Fuente: Elaboración propia

3.6.4.4 Alarmas

Las alarmas consideran únicamente aquellas condiciones destinadas a la alerta y supervisión del operador, sin implicar el bloqueo directo del proceso. El Cuadro 10 presenta la lista de alarmas consideradas para el sistema de llenado de camiones pesados. En el caso del sistema de separación en seco (Dry Cobbing), los bits de alarma serán obtenidos mediante comunicación y almacenados en el bloque de datos DB3 *Intlck_Faults_DC* del PLC10001, el cual se describe en el Cuadro 11, permitiendo su visualización y monitoreo en las pantallas HMI del sistema implementado.

Cuadro 10 Lista de alarmas del sistema de llenado automático.

Prioridad	Tag	Descripción
1	LALL-100-001	Alarma de nivel Bajo-Bajo de la tolva de material estéril.
2	LAHH-100-001	Alarma de nivel Alto-Alto de la tolva de material estéril.
2	LI-100-002-FL	Falla de medición del nivel del camión – lado izquierdo.
3	LALL-100-002	Alarma de nivel Bajo-Bajo del camión – lado izquierdo.
2	LAHH-100-002	Alarma de nivel Alto-Alto del camión – lado izquierdo.
1	LI-100-003-FL	Falla de medición del nivel del camión – lado derecho.
3	LALL-100-003	Alarma de nivel Bajo-Bajo del camión – lado derecho.
2	LAHH-100-003	Alarma de nivel Alto-Alto del camión – lado derecho.
3	100-RF-001-FL	Falla de comunicación RF – Sistema de tolva ↔ Cabina faja 3011.
3	100-RF-002-FL	Falla de comunicación RF – Sistema de tolva ↔ Cabina Planta 2.

3	200-HMI-001-FL	Falla del HMI de la cabina Dry Cobbing.
3	200-RF-001-FL	Falla de comunicación RF – Dry Cobbing ↔ Faja 3011.
3	200-RF-002-FL	Falla de comunicación RF – Dry Cobbing ↔ Planta 2.
3	300-HMI-001-FL	Falla del HMI de la cabina faja 3011.
3	300-RF-001-FL	Falla de comunicación RF – Faja 3011 ↔ Sistema de tolva.
3	300-RF-002-FL	Falla de comunicación RF – Faja 3011 ↔ Dry Cobbing.
3	400-HMI-001-FL	Falla del HMI de la cabina Planta 2.
3	400-RF-001-FL	Falla de comunicación RF – Planta 2 ↔ Dry Cobbing.
3	400-RF-002-FL	Falla de comunicación RF – Planta 2 ↔ Sistema de tolva.

Fuente: Elaboración propia

3.6.5 Lógica de control en PLC

La lógica de programación tiene una organización por bloques, en el Cuadro 9 se menciona los principales bloques configurados en el programa del controlador.

Cuadro 11 Principales bloques en el controlador PLC

Tipo de elemento	Bloque	Tag de bloque	Descripción
Bloque de organización	OB100	100_INC	Bloque de inicialización, configuración inicial de parámetros.
Bloque de organización	OB1	100_MAIN	Bloque donde se guarda la rutina de control principal. Ejecución cíclica. Desde este bloque se llaman a las funciones.
Función	FC1	100_DATA_IN_OUT	Lectura de datos de campo. Se leen las señales de la periferia y se asigna una memoria para poder usarlo en el programa. Escalamiento de los instrumentos.
Función	FC2	100_SEQNC_TOLVA	Contiene la lógica de la secuencia de llenado de la tolva de acuerdo con la filosofía de control.
Función	FC3	100_SEQNC_FAJAS	Contiene la lógica de la secuencia de arranque de fajas de acuerdo con la filosofía de control.
Función	FC4	100_COMM	Contiene los bloques driver para la comunicación con los otros elementos de la red.
Función	FC5	100_ALM_ITLK	Contiene la lógica para la activación de alarmas y enclavamientos.

Bloque de datos	DB1	Alarm_Faults	Bloque de datos que contiene los bits de disparo de las alarmas y fallas. Para la ventana de Alarmas.
Bloque de datos	DB2	Sistem_H_reg	Bloque de datos que contiene los parámetros del sistema de llenado de camiones.
Bloque de datos	DB3	Intlck_Faults_DC	Bloque de datos que contiene los parámetros del sistema de secuencia de fajas.
Bloque de datos	DB4	Data_PLC100	Bloque de datos que contiene los parámetros del sistema para ser mostrado en el SCADA.
Bloque de datos	DB5	Data_From_SCADA	Bloque de datos que contiene los parámetros que vienen del sistema SCADA existente.

Fuente: Elaboración propia

El programa del controlador se ejecuta a través de los bloques de organización (OB), específicamente en los bloques OB100 y OB1. El OB100 se ejecuta durante el arranque del PLC, mientras que el OB1 corresponde al ciclo principal de ejecución continua del programa. Desde estos bloques de organización se realiza la llamada a las funciones y bloques de función que conforman la lógica del sistema.

Las funciones (FC) y bloques de función (FB) se emplean para estructurar, simplificar y organizar el código, permitiendo una programación modular y ordenada. Dentro de los bloques de función se implementa la lógica de control asociada a cada servicio, equipo o subsistema.

Por su parte, los bloques de datos (DB) constituyen estructuras de almacenamiento que permiten agrupar distintos tipos de variables en memoria. Estos bloques se utilizan para configuraciones del sistema, almacenamiento de estados y facilitación del direccionamiento, tanto desde otros bloques del programa como desde equipos externos, como HMI o SCADA. Los bloques de función emplean estos bloques de datos para almacenar y retener información asociada a su funcionamiento.

En la Figura 18 se muestra el ciclo de arranque y ejecución del programa en el PLC, ilustrando la secuencia de inicialización y el funcionamiento continuo del controlador.

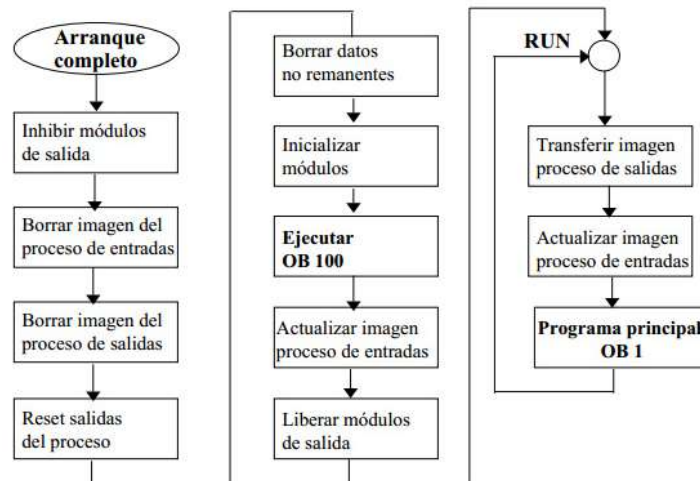


Figura 18: **Ciclo de arranque del CPU de un PLC.** Fuente: <https://www.infoplcn.net/descargas/106-siemens/software-step7-tiaportal/2029-ob100-bloque-arranque-automata-siemens>

3.6.5.1 Rutina de inicialización OB100

En esta rutina se configura los valores iniciales en la rutina de control general, en el PLC S7-1200 esta función le corresponde al bloque de organización OB100 que se ejecuta solo una vez al energizar el equipo o al realizar un arranque en caliente. Algunos de los parámetros configurados en esta parte del programa son:

- Valores de Rango de instrumentos LIT10001, LIT10002 y LIT10003.
- Valores de Alarma HH, H, L y LL de instrumentos LIT10001, LIT10002 y LIT10003.
- Valores de llenado. Nivel de llenado de tolva (75%) y Nivel de llenado de camión (90%)
- Tiempos de arranque. Tiempos para confirmar falla de accionamientos.

En la figura 19 se muestra el código del bloque OB100 para el sistema de llenado automático de camiones pesados. Estos valores serán ajustados después de la prueba de arranque del sistema.

IF...	CASE... OF...	FOR... TO DO...	WHILE... DO...	(*...*)	REGION		
1				(*Valores Iniciales LIT10001*)			
2				"LIT100001_Spam_Min" := 0.0; (*Valor minimo de escalamiento de instr*)		"LIT100001..."	%MD210
3				"LIT100001_Spam_Max" := 100.0; (*Valor maximo de escalamiento de instr*)		"LIT100001..."	%MD214
4				"LIT100001_Alm_HH" := 95.0; (*Valor de alarmas de instr*)		"LIT100001..."	%MD172
5				"LIT100001_Alm_H" := 93.0;		"LIT100001..."	%MD176
6				"LIT100001_Alm_L" := 30.0;		"LIT100001..."	%MD180
7				"LIT100001_Alm_LL" := 15.0;		"LIT100001..."	%MD184
8							
9				(*Tiempos de espera antes de falla*)			
10				"TRAFailOpen" := T#20s; (*Tiempo de espera abrir compuerta*)		"TRAFailOpen"	%MD190
11				"TRAFailClose" := T#20s; (*Tiempo de espera cerrar compuerta*)		"TRAFailCl..."	%MD194
12				"TRAFailUH" := T#20s; (*Tiempo de espera arranque unidad hidraulica*)		"TRAFailUH"	%MD198
13				"TRAFailConv" := T#20s; (*Tiempo de espera arranque fajas*)		"TRAFailConv"	%MD202
14				"TRAFailPM" := T#20s; (*Tiempo de espera arranque poleas*)		"TRAFailPM"	%MD206
15							
16				(*Parametros de operacion*)			
17				"SetNivelTolva" := 75.0; (*Nivel de llenado optimo de tolva superior*)		"SetNivelT..."	%MD168
18				"SetNivelCamion" := 80.0; (*Seteo de nivel de llenado de camion*)		"SetNivelC..."	%MD218
19							

Figura 19: **Rutina de inicialización OB100.** Fuente: Elaboración propia (2025).

3.6.5.2 Programa principal OB1

Dentro del programa principal tenemos la llamada a las funciones. En la figura 20 se muestra parte del programa principal que hace referencia a las 3 primeras funciones que tenemos.

Network 1:



Network 2:



Network 3:



Figura 20: **Principales funciones del programa principal OB1.** Fuente: Elaboración propia (2025).

3.6.5.3 Función para manejo de señales de periferia FC1

La función 100_DATA_IN_OUT, uno de los bloques de función descritos en el Cuadro 9, ha sido desarrollada en lenguaje SCL. Esta función actúa como un bloque central de gestión, desde el cual se realiza la llamada a tres tipos de

bloques de función: IO_DI para el manejo de entradas digitales, IO_DO para las salidas digitales y IO_AI para las entradas analógicas.

La función tiene como finalidad la asignación y vinculación de variables a los bloques de función definidos para el manejo de entradas y salidas digitales y analógicas, permitiendo una configuración estandarizada y eficiente de los dispositivos de campo. A través de esta estructura, es posible definir parámetros asociados a cada señal, tales como escalado, calibración y direccionamiento, facilitando el control y monitoreo del sistema.

A continuación, en la figura 21, se presenta un extracto del código desarrollado en lenguaje SCL correspondiente a algunas entradas y salidas del sistema.

100_DATA_IN_OUT	Void
0001	(* Entradas Digitales*)
0002	"IO_DI_DB_1" (IN:="DI00",
0003	SIM_MODE:="DI00_SM",
0004	FORCE_IN:="DI00_FI",
0005	BIN=>"ZS100001");
0006	(* Salidas Digitales*)
0007	"IO_DO_DB_1" (OUT:="XY100002",
0008	SIM_MODE:="DO00_SM",
0009	FORCE_OUT:="DO00_FI",
0010	BOUT=>"DO00");
0011	(* Entradas Analogas*)
0012	"IO_AI_DB" (IN:="LIT100001",
0013	LSL:="LIT100001_Min",
0014	HSL:="LIT100001_Max",
0015	LALIM:="LIT100001_LevelL",
0016	LLALIM:="LIT100001_LevelLL",
0017	HALIM:="LIT100001_LevelH",
0018	HHALIM:="LIT100001_LevelHH",
0019	UENG:='%',
0020	DESCR:='TRANS. NIVEL TOLVA SUP.',
0021	TAG:='LIT10001',
0022	SIM_ON:="LIT100001_SIM_ON",
0023	SIM_VAL:="Sim_LIT100001_Out",
0024	NORML=>"LIT10001_NORM",
0025	AIN=>"LIT100001_Out",
0026	ALARM STATUS=>"LIT100001_ALM_ST");

Figura 21: **Código SCL 100_DATA_IN_OUT**. Fuente: Elaboración propia (2025).

Bloque de función IO_DI

Este bloque de función gestiona y simula entradas digitales de manera óptima. Permite acceder a la simulación de entradas a través de la pantalla, facilitando

el proceso de comisionamiento. La Figura 22 muestra la lógica desarrollada en lenguaje Ladder correspondiente a este bloque de función.



Figura 22: **Lógica de bloque de función IO_DI.** Fuente: Elaboración propia (2025).

En la Figura 23 se muestra la interfaz gráfica desarrollada para el bloque de función IO_DI. El gráfico asociado a este bloque de función dispone de los siguientes botones de control:

- SIM que corresponde al estado de la marca #SIM_MODE, con este botón activaremos el modo simulación.
- FORZADO que corresponde al estado de la marca #FORCE_IN, con este botón podremos setear el estado que queramos en la entrada.
- CAMPO muestra el estado de la entrada digital que será asociada a la marca #IN
- OUT muestra el estado de la marca #BIN que iría a la lógica de control.

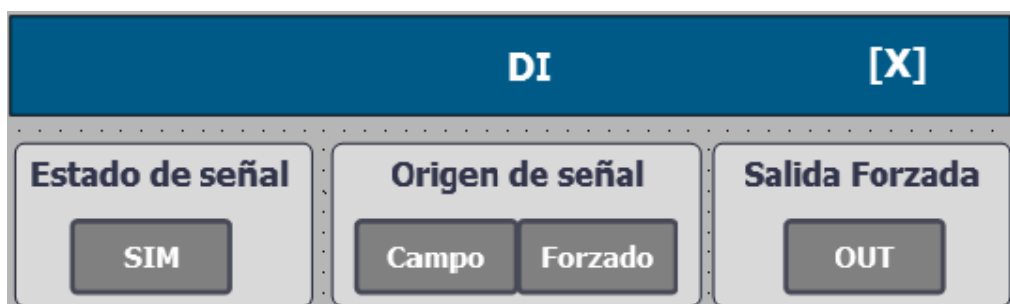


Figura 23: **Interfaz gráfica de bloque de función IO_DI.** Fuente: Elaboración propia (2025).

Bloque de función IO_DO

Este bloque de función gestiona y simula salidas digitales de manera óptima. Permite acceder a la simulación de entradas a través de la pantalla de la misma manera que IO_DI. La Figura 24 muestra la lógica desarrollada en lenguaje Ladder correspondiente a este bloque de función.



Figura 24: **Lógica de bloque de función IO_DO.** Fuente: Elaboración propia (2025).

En la Figura 24 se muestra la interfaz gráfica desarrollada para el bloque de función IO_DO. El gráfico asociado a este bloque de función dispone de los siguientes botones de control:

- SIM que corresponde al estado de la marca #SIM_MODE, con este botón activaremos el modo simulación.
- FORZADO que corresponde al estado de la marca #FORCE_IN, con este botón podremos setear el estado que queramos en la salida.
- LOGIC muestra el estado de la salida digital desde la lógica de control que será asociada a la marca #OUT
- FIELD muestra el estado de la marca #BOUT que será asociada a una salida física del PLC.

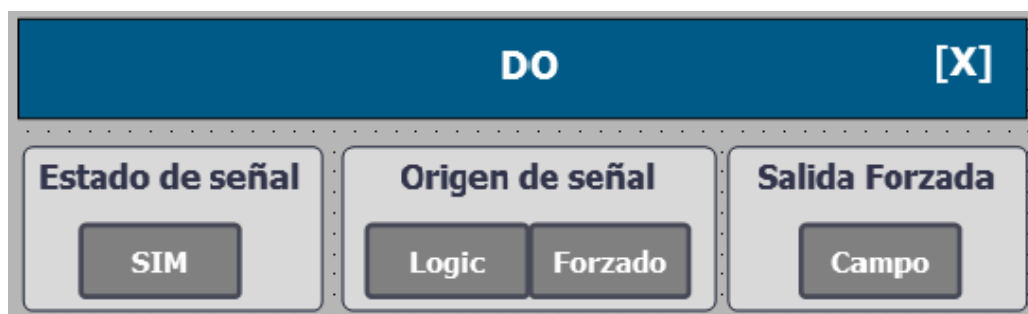


Figura 20: **Interfaz gráfica de bloque de función IO_DO.** Fuente: Elaboración propia (2025).

Bloque de función IO_AI

Al igual que los bloques descritos anteriormente, se dispone de un bloque de función para el manejo de datos analógicos, desarrollado en lenguaje SCL. Este bloque permite la gestión y simulación de señales analógicas de manera eficiente, habilitando el acceso a la simulación desde la pantalla HMI.

Para el tratamiento de señales analógicas se emplea el bloque IO_AI, el cual integra parámetros de simulación, alarmas, etiquetas, unidades de ingeniería y faceplate. Este bloque facilita las pruebas en campo, el comisionamiento y las tareas de mantenimiento. Asimismo, se utiliza para la configuración tanto de entradas como de salidas analógicas, y sus salidas son empleadas dentro de la lógica de control de la secuencia del sistema. La Figura 25 muestra la lógica desarrollada en lenguaje SCL correspondiente a este bloque de función.

```

0001 #NORML := NORM_X(MIN := #X_Min, VALUE := #IN, MAX := #X_Max);
0002 IF #SIM_ON = TRUE THEN
0003   #AIN := #SIM_VAL;
0004 ELSE
0005   #AIN := SCALE_X(MIN := #LSL, VALUE := #NORML, MAX := #HSL);
0006 END_IF;
0007
0008 IF #AIN >= #HHALIM THEN
0009   #ALARM_STATUS.%X0 := TRUE;
0010 ELSE
0011   #ALARM_STATUS.%X0 := FALSE;
0012 END_IF;
0013
0014 IF (#AIN >= #HALIM) AND (#AIN < #HHALIM) THEN
0015   #ALARM_STATUS.%X1 := TRUE;
0016 ELSE
0017   #ALARM_STATUS.%X1 := FALSE;
0018 END_IF;
0019
0020 IF (#AIN <= #LALIM) AND (#AIN > #LLALIM) THEN
0021   #ALARM_STATUS.%X2 := TRUE;
0022 ELSE
0023   #ALARM_STATUS.%X2 := FALSE;
0024 END_IF;
0025
0026 IF #AIN <= #LLALIM THEN
0027   #ALARM_STATUS.%X3 := TRUE;
0028 ELSE
0029   #ALARM_STATUS.%X3 := FALSE;
0030 END_IF;
0031
0032 IF #AIN < #LSL OR #AIN > #HSL THEN
0033   #ALARM_STATUS.%X4 := TRUE;
0034 ELSE
0035   #ALARM_STATUS.%X4 := FALSE;
0036 END_IF;

```

Figura 25: **Lógica SCL de bloque de función IO_AI.** Fuente: Elaboración propia (2025).

De la figura A partir de la Figura 25, se describen los aspectos más relevantes del código desarrollado en lenguaje SCL para el manejo de señales analógicas:

- Línea 1: Se ejecuta la función de normalización, mediante la cual el valor de entrada #IN, correspondiente a la señal analógica proveniente del campo, es escalado a un rango entre 0 y 1. Los parámetros X_min y X_max se definen como 0 y 27648, respectivamente, valores que corresponden a las cuentas estándar de una entrada analógica según la documentación de Siemens. Como resultado, la variable #NORML toma un valor normalizado en función de la magnitud de la señal de entrada.
- Línea 2: En función del estado de la variable #SIM_ON, se selecciona el valor que será procesado por el bloque. Si la simulación se encuentra deshabilitada, se utiliza el valor real de campo #IN; caso contrario, se emplea el valor #SIM_VAL, el cual puede ser configurado desde la pantalla HMI. Esta lógica permite realizar simulaciones de señal de forma controlada durante pruebas y comisionamiento.
- Líneas 8 a 35: Se implementa la lógica de gestión de alarmas, correspondiente a los niveles Alto-Alto (HH), Alto (H), Bajo (L), Bajo-Bajo (LL) y condición fuera de rango, permitiendo una supervisión adecuada del comportamiento de la señal analógica y su integración con el sistema de alarmas del proceso.

En la Figura 26 se muestra la interfaz gráfica desarrollada para el bloque de función IO_DO. El gráfico asociado a este bloque de función dispone de los siguientes botones de control:

- SIM que corresponde al estado de la marca #SIM_ON, con este botón activaremos el modo simulación.

- FORCE que corresponde al estado de la marca análoga #SIM_VAL, este valor se reflejará en la salida OUT si el valor de #SIM_ON está en estado lógico 1.
- OUT corresponde al valor análogo que se estaría utilizando en la lógica de control de secuencia.
- FIELD corresponde al valor de lectura del instrumento en campo.
- Los valores de HH, H, L y LL pueden igualarse desde el HMI, al igual que los valores de Span.

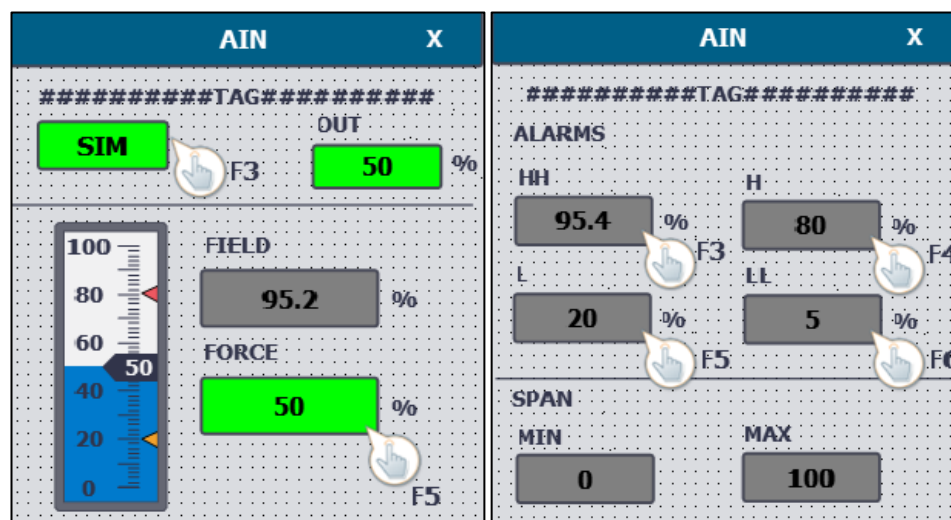


Figura 26: **Interfaz gráfica de bloque de función IO_AI.** Fuente: Elaboración propia (2025).

3.6.5.4 Función de secuencia de llenado automático.

La función 100_SEQNC_TOLVA, uno de los bloques de función descritos en el Cuadro 9, ha sido desarrollada en lenguaje SCL y corresponde a la lógica de secuencia que ejecuta el autómata cuando el sistema de llenado automático de camiones opera en modo Remoto Automático (ver código completo en anexo 3).

En esta función se definen y enumeran los pasos del ciclo de llenado, asignando a cada uno un índice de secuencia, el cual se actualiza progresivamente conforme avanza la ejecución del código. La cantidad y

estructura de los pasos se encuentra determinada, en parte, por el diagrama de flujo del sistema de llenado automático de camiones pesados descrito en la figura 17, garantizando coherencia entre el diseño funcional y la implementación del software.

Asimismo, una parte de la lógica se ejecuta fuera de la secuencia de pasos, lo que permite procesar condiciones independientes del estado actual de la secuencia, tales como la gestión de enclavamientos, alarmas y condiciones de seguridad, asegurando una operación confiable del sistema en todo momento. A continuación, se detalla la programación explicando cada estado del sistema, cabe aclarar que todos estos estados están programados dentro de la función 100_SEQNC_TOLVA.

Sistema fuera de servicio

En la Figura 27 se presenta el código SCL correspondiente al estado 0 de la secuencia, denominado sistema fuera de servicio. En este estado, el sistema permanece inactivo y se realiza la evaluación de las condiciones iniciales de operación, conforme a lo establecido en la filosofía de control (línea 3). Una vez que dichas condiciones son satisfechas, se habilita el botón START_SA (línea 5), permitiendo al operador iniciar la secuencia automática de llenado. Al presionar este botón, el sistema avanza al estado 1 de la secuencia (línea 7), correspondiente a la verificación de las condiciones de llenado, dando inicio al ciclo automático del proceso.

```

0001 CASE "index_sa" OF
0002   0: // SISTEMA FUERA DE SERVICIO
0003     "PERM_SA" := "DRY_COBB_ON" AND "FAJA_3009_ON" AND "HS01A_ON" AND NOT
      ("ZES10001") AND NOT ("ZES10002") AND NOT ("ZS10001") AND NOT "ZS10002" AND
      NOT ("KM01A_ON") AND NOT ("INTLK_GEN") AND NOT ("UL10001") AND NOT
      ("UL10002");
0004     IF "PERM_SA" = TRUE THEN
0005       "ENABLE_START_SA" := TRUE;
0006       IF "BUTTON_START" = TRUE THEN
0007         "index_sa" := 1;
0008       ELSE
0009         "index_sa" := 0;
0010       END_IF;
0011     ELSE
0012       "ENABLE_START_SA" := FALSE;
0013     END_IF;
0014   ;

```

Figura 27: **Código SCL para sistema automático estado fuera de servicio.** Fuente: Elaboración propia (2025).

Verificación de condiciones para inicio de llenado

En la Figura 28 se presenta el código SCL correspondiente al estado 1 de la secuencia. En este paso se verifica el estado de los sensores de nivel (línea 16), los cuales cumplen la función de medir la carga y detectar la presencia de un camión minero ubicado debajo de la tolva. El sistema permite la tolerancia a la falla de uno de los sensores; sin embargo, en caso de que se detecte una falla en el sensor de nivel de la tolva inferior, el sistema retorna al estado 0 (línea 20), impidiendo la continuación del proceso de llenado por razones de seguridad y confiabilidad operativa. Durante la ejecución de este paso, el semáforo del sistema indica una luz roja intermitente (línea 24), señalizando que el sistema se encuentra en una etapa de verificación previa al inicio del llenado automático.

```

0015  1:  // VERIFICACION DE CONDICIONES DE INICIO DE LLENADO
0016  "COND_1" := (NOT("LIT10002_FAULT") OR NOT("LIT10003_FAULT")) AND
      NOT("LIT10001_FAULT")
0017  IF ("LIT10001" > "C_LLENADO_TS") AND ("COND_1" = TRUE) THEN
0018    "index_sa" := 2;
0019  ELSE
0020    IF ("LIT10001_FAULT" = TRUE) OR ("INTLK_GEN" = TRUE) THEN
0021      "index_sa" := 0;
0022    END_IF;
0023  END_IF;
0024  "CMD_UL10002_SA" := "Clock_1Hz";
0025  ;

```

Figura 28: **Código SCL para sistema automático estado verificación de condiciones de llenado.** Fuente: Elaboración propia (2025).

Sistema listo en espera de camión

En la Figura 28 se presenta el código SCL correspondiente al estado 2 de la secuencia, en este estado se mantiene el semáforo en color verde en todo momento indicando que el sistema está en espera, se inhabilita temporalmente el sensor LIT10001 y se establece un tiempo mínimo de validación, denominado C_POSICION_TI, durante el cual los sensores deben detectar de forma continua la presencia de las llantas del camión (líneas 38 a 44). Este tiempo garantiza que el vehículo se encuentre correctamente posicionado debajo de la tolva.

Adicionalmente, se incorporan dos condiciones de validación: que al menos uno de los sensores de la tolva inferior se encuentre operativo (línea 46) y que los transmisores de nivel registren una altura compatible con la de un camión vacío. Cuando ambas condiciones se cumplen, el sistema asume que existe un camión correctamente posicionado y listo para ser cargado.

En este escenario, el semáforo cambia a luz roja fija (línea 48) y el sistema da inicio al proceso de llenado automático. En caso contrario, si el camión no se encuentra correctamente estacionado, el semáforo permanece en rojo intermitente (línea 54), indicando al conductor la necesidad de corregir la posición antes de continuar con la secuencia.

```

0036 2: // SISTEMA LISTO EN ESPERA DE CAMION
0037
0038 "COND_2" := (NOT ("LIT10002_FAULT") OR NOT ("LIT10003_FAULT"));
0039 "Timer_ZES10001_P2".TON(IN := "ZES10001",
0040     PT := DINT_TO_TIME("C_POSICION_TI"),
0041     Q => "ZES10001_T");
0042 "Timer_ZES10002_P2".TON(IN := "ZES10002",
0043     PT := DINT_TO_TIME("C_POSICION_TI"),
0044     Q => "ZES10002_T");
0045
0046 IF "ZES10001_T" = TRUE AND "ZES10002_T" = TRUE AND "COND_2" = TRUE AND
("LIT100023_TI" > "C_NIVEL_CAMION") THEN
0047     "index_sa" := 3;
0048     "CMD_UL10001_SA" := TRUE;
0049 ELSE
0050     IF "INTLK_GEN" = TRUE THEN
0051         "index_sa" := 0;
0052     ELSE
0053         "index_sa" := 2;
0054         "CMD_UL10002_SA" := "Clock_1Hz";
0055     END IF;
0056 END IF;

```

Figura 29: **Código SCL para sistema automático estado en espera de camión.** Fuente: Elaboración propia (2025).

CAPITULO IV: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Descripción de la implementación

4.1.1 Descripción de las pantallas de operador

Antes de analizar en detalle cada una de las pantallas, se describirán las características comunes a todo el sistema. Para ello, se utilizará la barra superior, representada en la figura 30, la cual estará presente en todas las pantallas.

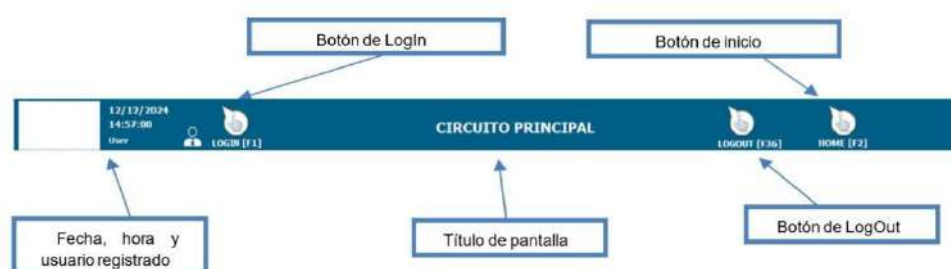


Figura 30: **Barra superior de pantallas HMI.** Fuente: Elaboración propia (2025).

Al carecer de pantalla táctil, se pulsará el botón asociado de acuerdo con la representación en la pantalla, por ejemplo: Para ingresar a la pantalla principal se ha asociado el botón F10, el operador pulsará el botón una vez para dirigirse a dicha pantalla.

4.1.2 Pantalla general

La pantalla principal, representada en la figura 31, presenta información de las variables más relevantes de los equipos que intervienen en el sistema de

separación en seco (Dry Cobbing), tales como la frecuencia de referencia de los motores de alimentación, corriente de motores de faja y la corriente de las poleas. Además, permite el comando de arranque y parada de las fajas, el cual se encuentra condicionado tanto al usuario registrado como a la secuencia de arranque definida para cada faja. Por esta razón, al intentar accionar alguna faja, se desplegará un recuadro solicitando el registro de usuario y contraseña. Adicionalmente, la pantalla proporciona información del sistema de tolva, incluyendo el nivel de material, el porcentaje de apertura de la compuerta, la posición del camión y el estado del semáforo, facilitando así la supervisión integral del proceso.

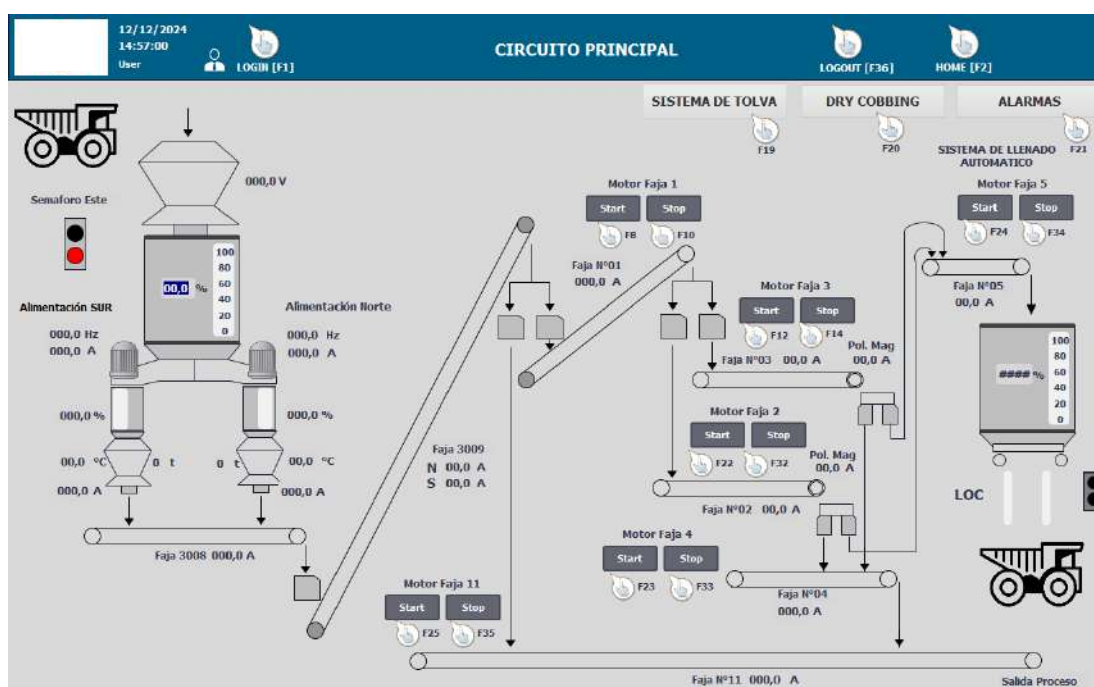


Figura 31: **Pantalla general de HMI.** Fuente: Elaboración propia (2025).

4.1.2.1 Pantalla sistema de llenado de camiones

- **Pantalla sistema de llenado de camiones manual**

A continuación, en la figura 32, se describen los elementos que conforman la pantalla de operación para el control de llenado de camiones en modo manual, desde la cual el operador puede ejecutar las acciones necesarias para dicho proceso.

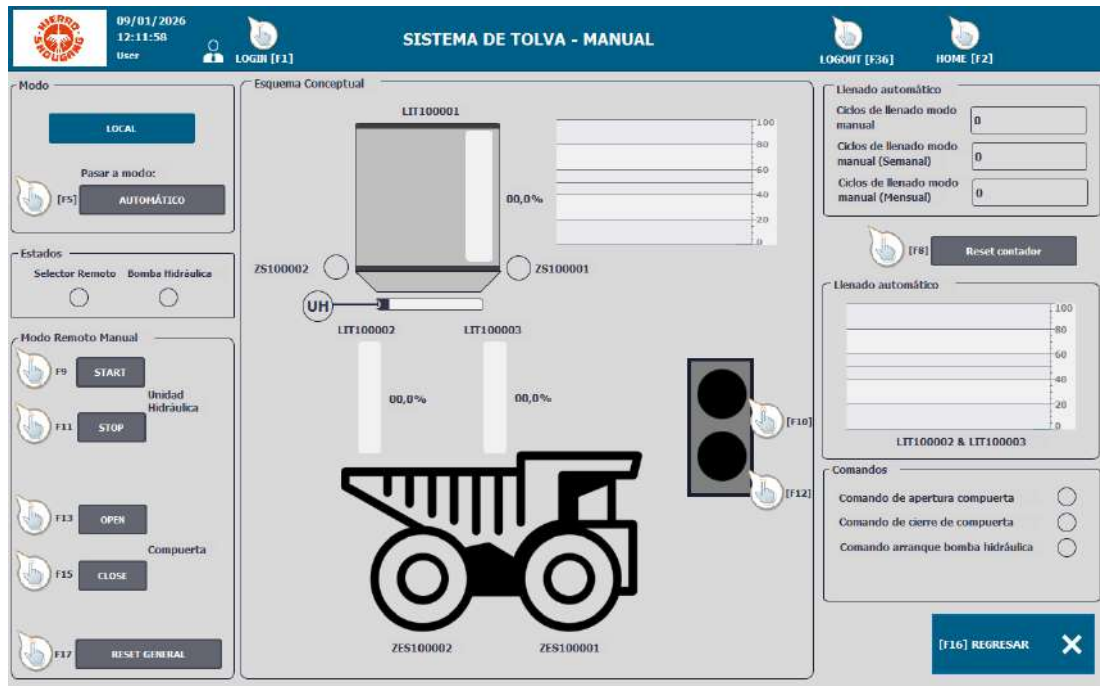


Figura 32: **Pantalla sistema de llenado de camiones manual de HMI.**
Fuente: Elaboración propia (2025).

- Indicador de posición de selector (Local/Remoto)

Representa gráficamente la posición del selector ubicado en el tablero de control de la unidad hidráulica.

- Botón de cambio de modo - F5 (Remoto local/Remoto automático)

Al pulsar el siguiente botón se hace el cambio de modo partiendo desde el modo anterior, si nos encontramos en modo remoto manual entonces cambiará a modo remoto automático y viceversa.

- Botones de comando de unidad hidráulica – F9 y F11

Al estar seleccionada la posición del selector en remoto, se podrá arrancar y parar la unidad hidráulica pulsando los botones (F9) y (F11) respectivamente.

- Botones de comando de compuerta – F13 y F15

Al estar seleccionada la posición del selector en remoto, se podrá abrir y cerrar la compuerta, pulsando de manera permanente el botón (F13) y (F15) respectivamente.

- Botón de Reset de contador – F8

Al realizar un ciclo completo de llenado en el modo remoto manual la cuenta de ciclos se incrementa en 1, para resetar el contador, se debe pulsar manualmente en el botón (F8).

- Botón de Reset General – F17

El botón de reset general es pulsado ante la ocurrencia de una falla, indistintamente de modo de operación

• Pantalla sistema de llenado de camiones automático

A continuación, en la figura 33, se describen los elementos que conforman la pantalla de operación para el control de llenado de camiones en modo automático, desde la cual el operador puede activar la secuencia de llenado.

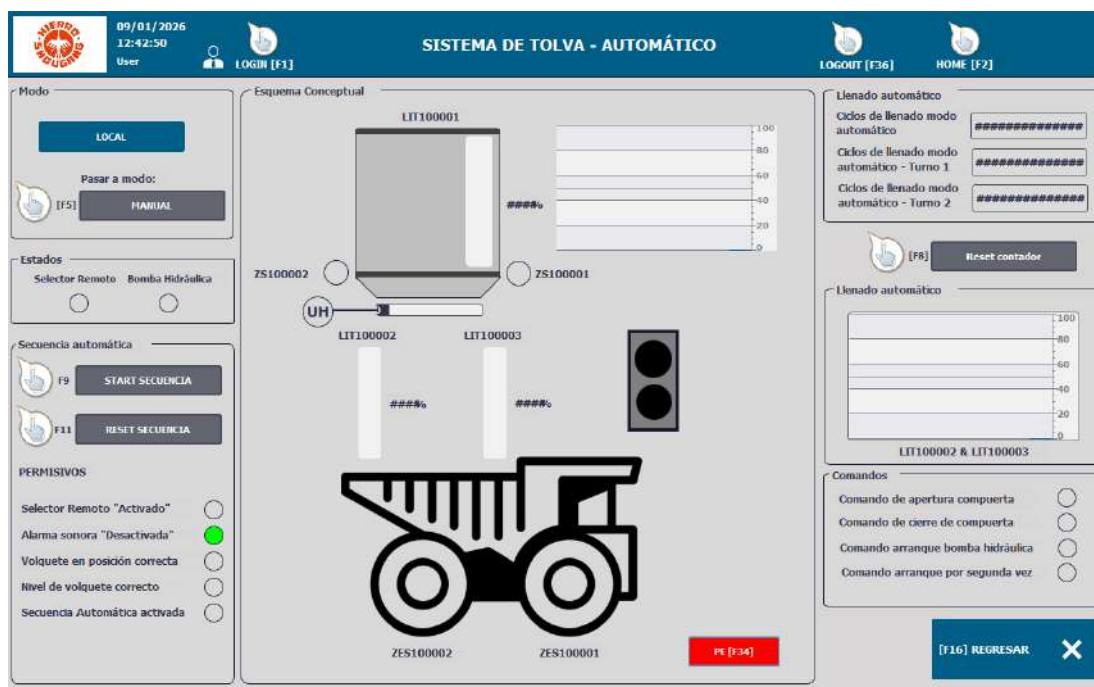


Figura 33: **Pantalla sistema de llenado de camiones automático de HMI.**
Fuente: Elaboración propia (2025).

- Botones de secuencia automática – F9 y F11

El botón “Start Secuencia” (F9) inicia un bucle automático de ciclos de llenado de duración indeterminada, mientras que el botón “Stop Secuencia” (F11) permite interrumpir la secuencia en cualquier momento. Las condiciones iniciales y los criterios de habilitación para la ejecución de la secuencia de llenado automático se encuentran definidos en por la “Filosofía de Control” detallado en el apartado 3.6.4.2 de este trabajo.

Cada vez que se completa un ciclo de llenado en el modo remoto automático, el contador de ciclos se incrementa en una unidad. Para reiniciar dicho contador, el operador debe accionar manualmente el botón de “Reset de contador” (F8).

- Botón de parada de emergencia – F34

Al ser accionado, este botón provoca la detención inmediata del sistema, forzando la interrupción de todas las operaciones en curso y retornando los equipos a su estado seguro o condición inicial, conforme a la lógica de seguridad implementada. Su utilización está destinada a situaciones que requieran una parada inmediata por razones operativas o de seguridad.

4.1.2.2 Pantalla de sistema de separación en seco

A continuación, en la figura 34, se describen los elementos que conforman la pantalla de operación para sistema de separación en seco. En esta vista se presenta una visualización detallada del sistema mencionado, donde se muestran las corrientes de los motores de las fajas transportadoras, así como los estados de enclavamientos y permisivos asociados a cada motor. Asimismo, la pantalla permite el control de arranque y parada de las fajas transportadoras y de las poleas magnéticas, incluyendo la indicación de sus respectivos permisivos y enclavamientos, el punto de ajuste de corriente de las poleas magnéticas, y una representación gráfica de la tolva de material estéril, facilitando el monitoreo integral del proceso.

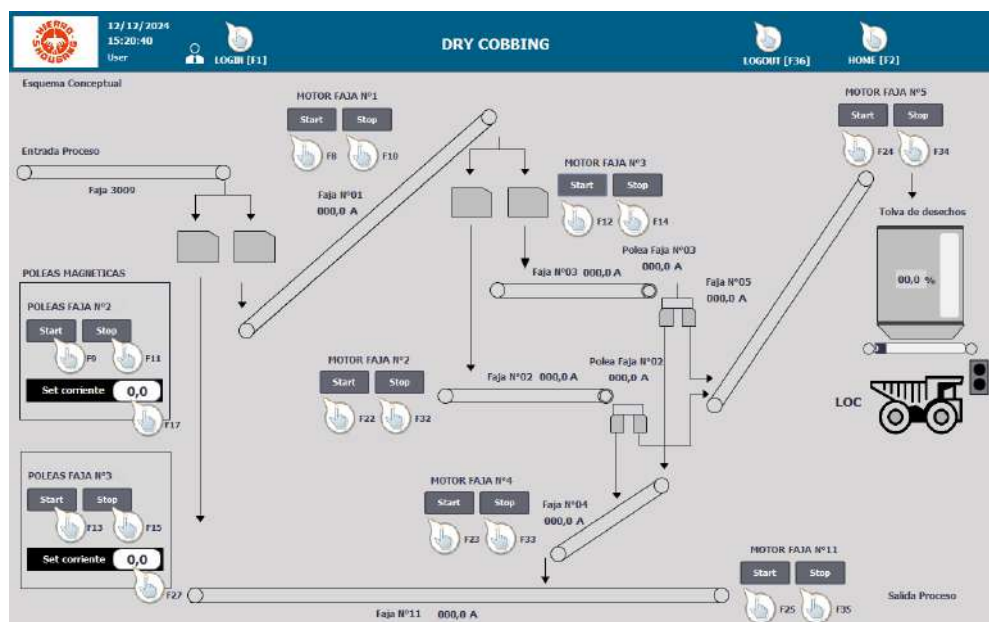


Figura 34: **Pantalla de separación en seco de HMI.** Fuente: Elaboración propia (2025).

4.1.2.3 Pantalla de configuración

La pantalla de configuración permite modificar parámetros de tiempo de la secuencia automática de llenado, valores mínimos de operación, valores límites alto y muy alto, etc.

Figura 35: **Pantalla configuración de sistema de tolva de HMI.** Fuente: Elaboración propia (2025).

En la secuencia automática se puede configurar los siguientes parámetros:

- Nivel de tolva de desmonte: Es el nivel que debe tener la tolva de desmonte para poder realizar un llenado en modo automático.
- Nivel promedio de tolva de camión: Es el valor promedio de los sensores de tolva de camión, utilizado durante el ciclo de llenado para indicar al controlador que debe comandar el cierre de la compuerta.
- Tiempo de confirmación de bomba hidráulica: Es el tiempo máximo admisible para que el controlador registre la confirmación de arranque, durante un llenado en modo automático.
- Tiempo de confirmación de apertura de compuerta: Es el tiempo máximo admisible para que el controlador registre el contacto del sensor inductivo ubicado a un 60% de apertura.
- Tiempo de confirmación de clausura de compuerta: Es el tiempo máximo admisible para que el controlador registre el contacto del sensor inductivo ubicado a un 0% de apertura.
- Tiempo de posicionamiento correcto: Es el tiempo máximo de confirmación para que los sensores de los neumáticos confirmen un posicionamiento correcto de camión.

4.1.3 Instalación de equipos en campo

Se realizó el canalizado, conexión y montaje de equipos.

4.1.3.1 Instalación de tableros

La Figura 36 muestra la instalación de los tableros de control correspondientes al sistema implementado. La disposición de los equipos en cada tablero se

menciona en el Anexo 1. En la entrada de la caseta del operador del sistema de tolva se instaló el tablero 100-CP-01, el cual alberga el PLC Siemens S7-1200, junto con su soporte metálico correspondiente. En la cabina del operador de la faja 3011, se instaló el tablero 300-CP-01, que incorpora la pantalla HMI, montado sobre un soporte metálico soldado a una base de acero de 1/4" de espesor, la cual se encuentra anclada a las paredes de la cabina. Asimismo, dentro de la cabina del operador del sistema Dry Cobbing, se instaló el tablero 200-CP-01 con su respectiva pantalla HMI, montado sobre un soporte metálico soldado a una base de acero de 1/4" de espesor, la cual se encuentra anclada al grating mediante ángulos estructurales y espárragos pasantes. Finalmente, en la cabina del operador de Planta 2, se instaló el tablero 400-CP-01, que contiene una pantalla HMI, montado sobre un soporte metálico anclado al piso de concreto mediante pernos de expansión, asegurando una instalación firme y segura..



Figura 36: **Tableros montados en sus áreas respectivas.** Fuente: Elaboración propia (2025).

4.1.3.2 Instalación de antenas

Se realizó la instalación de las antenas de radiofrecuencia (RF) correspondientes al sistema de comunicación del proyecto. En el Área 100, como se muestra en la Figura 37, se instalaron las antenas de rótulos 100-RF-01 y 100-RF-02 sobre tubos de acero de 1 ½", apoyados en las vigas horizontales estructurales del área. En el Área 300, de acuerdo con la Figura 38, se instalaron las antenas de rótulos 300-RF-01 y 300-RF-02 sobre un tubo de acero de 1 ½", utilizando el soporte correspondiente, el cual fue soldado al grating. De manera similar, en el Área 200, también mostrada en la Figura 38, se instalaron las antenas de rótulos 200-RF-01 y 200-RF-02 sobre un tubo de acero de 1 ½", con su respectivo soporte soldado al grating. Finalmente, en el Área 400, según se aprecia en la Figura 39, se instalaron las antenas de rótulos 400-RF-01 y 400-RF-02 sobre un tubo de acero de 1 ½", utilizando el soporte correspondiente soldado al grating, cuya ubicación se detalla en la figura.



Figura 37: **Antenas montadas en el área 100.** Fuente: Elaboración propia (2025).



Figura 38: **Antenas montadas en el área 200 y 300.** Fuente: Elaboración propia (2025).



Figura 39: **Antena montada en el área 400.** Fuente: Elaboración propia (2025).

4.1.3.3 Instalación de instrumentos

Los transmisores de nivel fueron instalados en la tolva de material estéril – Area 100, tal como se muestra en la figura 40, utilizando la estructura de montaje correspondiente, revisar anexo 2 para más detalles. Durante la instalación, se realizaron ajustes en los parámetros específicos de los transmisores LIT-10002 y LIT-10003, manteniendo una orientación inclinada

de 5° respecto al eje vertical, con el fin de optimizar la medición y evitar ecos indeseados durante el proceso de llenado.



Figura 40: **Transmisores de nivel LIT10002 y LIT10003.** Fuente: Elaboración propia (2025).

Los sensores ZS10001 y ZS10002 fueron instalados en la tolva de material estéril – Área 100, tal como se muestra en la Figura 41, revisar anexo 2 para más detalles. Adicionalmente, se instaló una plancha metálica de referencia, la cual permite la detección de las posiciones de compuerta abierta y compuerta cerrada, asegurando una señal confiable para el control del sistema.



Figura 41: **Sensores de posición inductivos ZS10001 y ZS10002.** Fuente: Elaboración propia (2025).

Los sensores de posición; emisores (ZES-10001 y ZES-10002) y receptores (ZX-10001 y ZX-10002) fueron instalados tal como se muestra en la Figura 42, ubicados estratégicamente para detectar la presencia de la llanta del camión volquete cuando este se encuentra correctamente estacionado en la zona de carga, revisar anexo 2 para más detalles. La disposición de los detectores permite una detección confiable del posicionamiento del camión, condición necesaria para autorizar el inicio del proceso de llenado del material.



Figura 42: **Sensores emisores y receptores para detección de posición.**
Fuente: Elaboración propia (2025).

4.1.3.4 Instalación de cámaras

La Figura 43 muestra la instalación de las cámaras (100-CAM-001 y 100-CAM-002), las cuales fueron instaladas en el área 100 y orientadas hacia la tolva del camión volquete con el objetivo de permitir la supervisión visual del proceso de llenado por parte del operador de planta 2, facilitando la detección oportuna de cualquier evento durante la operación, revisar anexo 2 para más detalles.



Figura 43: **Cámaras y CCTV en sala de control.** Fuente: Elaboración propia (2025).

4.1.4 Pruebas de funcionamiento

4.1.4.1 Inspección inicial

Se llevó a cabo una inspección visual integral del sistema, con el objetivo de verificar la correcta instalación de todos los instrumentos, comprobando la continuidad e integridad del cableado, así como la adecuada conexión a tierra de los instrumentos y de los gabinetes eléctricos. Esta actividad se realizó con el acompañamiento del personal del área de mantenimiento del cliente, quienes serán los responsables de la operación y mantenimiento del sistema implementado.

Adicionalmente, se inspeccionó la instalación mecánica y eléctrica, verificando el correcto montaje y fijación de gabinetes, antenas y tableros. Asimismo, se validó la correcta instalación y orientación de las cámaras, así como la configuración y operatividad de la red de comunicaciones, asegurando que el sistema se encuentre en condiciones adecuadas para su puesta en servicio.

4.1.4.2 Pruebas funcionales

4.1.4.2.1 Pruebas funcionales de los instrumentos análogos

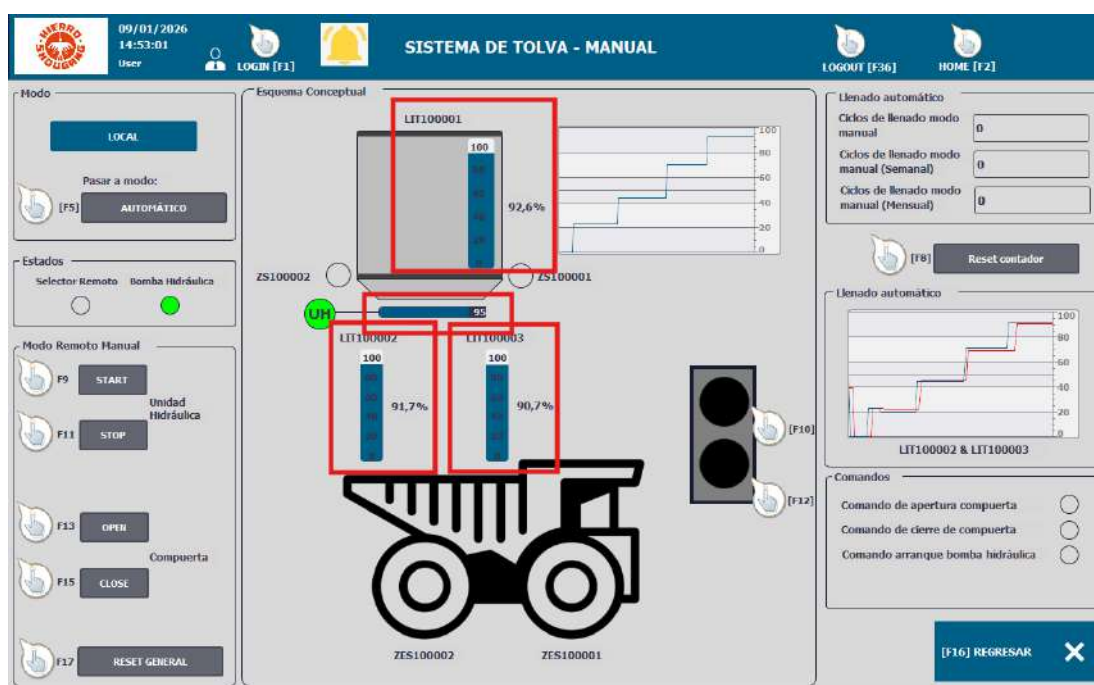


Figura 44: **Prueba de instrumentos análogos.** Fuente: Elaboración propia (2025).

Se realiza una verificación individual de todos los equipos e instrumentos. En el caso de los transmisores de nivel, se prueba su funcionamiento simulando valores en la escala de 0 a 100% (4-20 mA) en el instrumento como se detalla en la figura 44. La simulación incluye puntos específicos como 25%, 50% y 100% para cada transmisor. Después de la prueba de simulación, se procede a simular condiciones reales de operación, aplicando valores reales de nivel y distancia a los transmisores de nivel y al sensor de distancia, respectivamente. Para ello, se utilizan elementos físicos, como el movimiento de la compuerta

o la colocación de sólidos en la zona de medición de los transmisores de nivel, con el fin de verificar su correcta respuesta en condiciones reales. Al finalizar las pruebas se emite el protocolo de pruebas respectivo.

4.1.4.2.2 Pruebas funcionales de los instrumentos digitales

En el caso de los instrumentos digitales, se realiza una prueba similar con los sensores de las llantas delanteras y traseras, así como con los sensores de posición de la compuerta de la tolva como muestra la figura 45. La prueba se realiza en campo simulando las condiciones reales de operación, mediante la colocación de sólidos en la zona de medición, con el objetivo de verificar el correcto funcionamiento del instrumento.

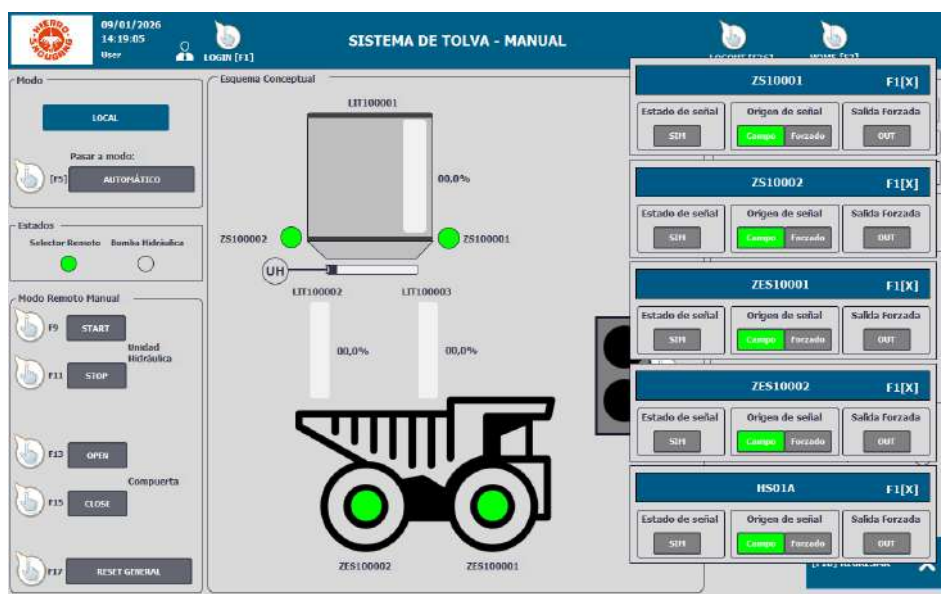


Figura 45: **Pruebas de instrumentos digitales.** Fuente: Elaboración propia (2025).

4.1.4.2.3 Prueba de la integridad de la red

Para la red de comunicaciones, se realizó una prueba de conectividad desde el Área 400, la cual corresponde al punto de integración con el sistema de control existente. Durante esta prueba se ejecutaron pruebas de PING hacia los PLCs y HMIs ubicados en el Áreas 100, 200 y 300, verificándose la correcta comunicación con todos los puntos de control. Asimismo, se

evaluaron los tiempos de respuesta (latencia) observados en la ventana de PING, registrándose valores promedio del 128 ms. Adicionalmente, se verificó el tiempo de restablecimiento de las comunicaciones ante interrupciones momentáneas.

En cuanto a la comunicación inalámbrica, se obtuvo el registro de diagnóstico de cada antena mediante el software RADWIN Manager, provisto por el fabricante. A partir de estos registros se analizó la información correspondiente a los niveles de RSL (Received Signal Level) y TSL (Transmit Signal Level) de cada enlace, evaluando el comportamiento de la potencia de transmisión y recepción. Los datos históricos, recopilados desde la puesta en servicio de las antenas, evidencian que los niveles de señal se mantienen estables y dentro de los rangos esperados de operación. Los valores de RSL presentan un amplio margen respecto al umbral de sensibilidad del sistema, mientras que los valores de TSL se mantienen constantes, lo que confirma que las antenas operan con niveles de potencia adecuados y sin indicios de degradación del enlace.

A continuación, correspondiente a la antena 100-RF-001; para fines didácticos, en el presente trabajo solo se incluye el gráfico de esta antena como representación del comportamiento del enlace inalámbrico que se refleja en la figura 46. Del análisis se concluye que los niveles de RSL se mantienen estables, dentro de un rango aproximado entre -44 y -39 dBm, sin caídas abruptas ni tendencias de degradación, lo que indica un margen de señal adecuado y una alta confiabilidad del enlace. Asimismo, el TSL permanece constante en -30 dBm durante todo el período evaluado, evidenciando una correcta configuración de potencia de transmisión y la ausencia de condiciones adversas como interferencias, desalineación o pérdidas significativas. En conjunto, los resultados confirman que la antena 100-RF-001 opera bajo condiciones normales y satisfactorias para la comunicación del sistema de control.

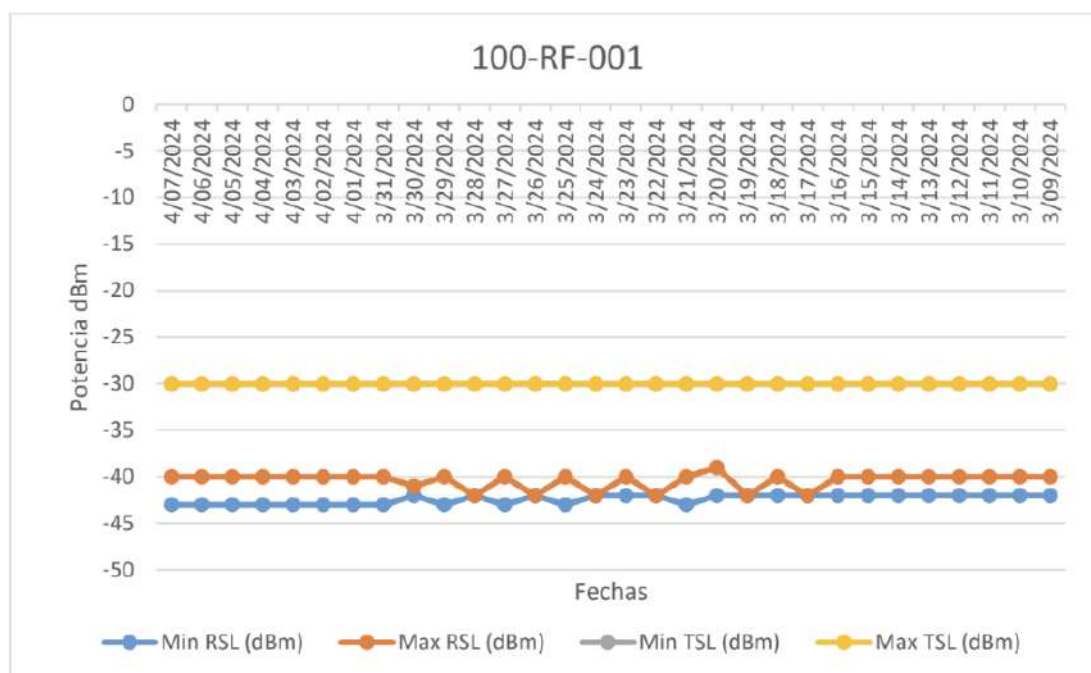


Figura 46: **Gráfico de Potencia de antena 100-RF-001 en los meses de marzo-abril.** Fuente: Elaboración propia (2025).

Para las cámaras del sistema de circuito cerrado de televisión (CCTV), se realiza una prueba de conectividad, ya que son cámaras IP. Se verifica la resolución de las imágenes y se comprueba que el DVR esté almacenando correctamente los videos. Además, se asegura que las cámaras estén instaladas en el ángulo adecuado para una cobertura óptima.

4.1.4.2.4 Pruebas de lógica de control

- **Pruebas de lógica de control de sistema de llenado de camiones**

Las pruebas de las secuencias de la lógica de control se realizaron en paralelo con la operación normal del proceso. Previo a la ejecución de las secuencias automáticas, se efectuaron pruebas individuales de los enclavamientos y permisivos, las cuales fueron simuladas y validadas mediante un formato de prueba de enclavamientos, asegurando que cada condición de bloqueo actuara correctamente ante estados anómalos del proceso. El Cuadro 10 muestra los enclavamientos y el resultado de las pruebas.

Cuadro 12 Prueba de enclavamientos de sistema de llenado de camiones.

Interlock	Descripción	Forma de simulación	Respuesta esperada del sistema	Resultado
I-001	Falla del procesador y/o módulos (AI, DI, DO) del PLC del sistema de tolva	Simulación de falla de CPU / forzado de bit de falla en PLC	Inhibición total del modo automático, activación de alarma general y bloqueo de salidas	Conforme
I-002	Falla de apertura de compuerta del sistema de tolva	Forzar orden de apertura sin confirmación de posición	Bloqueo de secuencia automática y generación de alarma	Conforme
I-003	Falla de cierre de compuerta del sistema de tolva	Simular cierre incompleto de compuerta	Inhibición de liberación de camión y alarma activa	Conforme
I-004	Falla de bomba hidráulica del sistema de tolva	Forzado de señal de falla de bomba	Bloqueo de apertura de compuerta y parada del sistema	Conforme
I-005	Falla de medición del nivel de la tolva de desmonte	Desconexión / simulación de señal inválida	Inhibición de secuencia automática y alarma	Conforme
I-006	Falla de medición del nivel del camión – lado izquierdo	Simulación de pérdida de señal	Bloqueo del cálculo de llenado y alarma	Conforme
I-007	Falla de medición del nivel del camión – lado derecho	Simulación de pérdida de señal	Bloqueo del cálculo de llenado y alarma	Conforme
I-008	Alarma de nivel Bajo-Bajo de la tolva de desmonte	Simulación de nivel mínimo	Bloqueo de inicio de secuencia de llenado	Conforme
I-009	Falla de salida de camión del sistema de tolva	Simulación de camión detenido	Activación de alarma y bloqueo de nuevo ciclo	Conforme

		tras señal de salida		
I-010	Falla de posicionamiento del camión bajo la tolva	Colocación de objeto fuera de posición	Inhibición de apertura de compuerta	Conforme
I-011	Alarma de nivel Alto-Alto del camión – lado izquierdo	Simulación de nivel > 90%	Cierre inmediato de compuerta	Conforme
I-012	Alarma de nivel Alto-Alto del camión – lado derecho	Simulación de nivel > 90%	Cierre inmediato de compuerta	Conforme
I-013	Falla general del sistema de tolva	Activación de falla global	Parada segura del sistema y bloqueo total	Conforme

Fuente: Elaboración propia

Durante las pruebas de la lógica de control, las variables de la lógica fueron monitoreadas desde el software TIA Portal, como se muestra en la figura 47, permitiendo observar en tiempo real la ejecución de la lógica de control. En este contexto, se realizaron ajustes en la orientación de los sensores de nivel, las distancias de censado, la potencia de los emisores de posicionamiento de las llantas, así como modificaciones en tiempo real de las secuencias programadas.

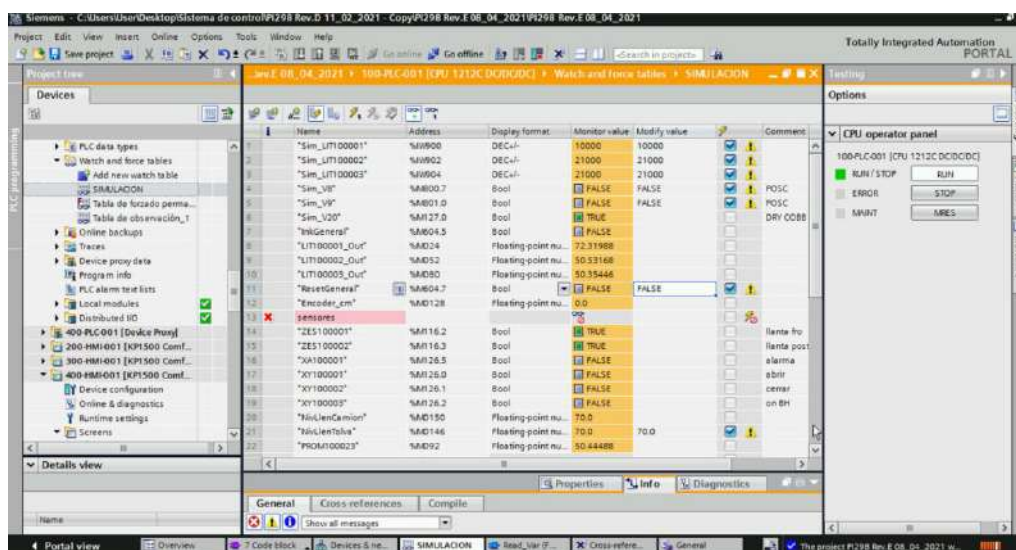


Figura 47: Monitoreo de variables en pruebas de lógica de control.
Fuente: Elaboración propia (2025).

Se verifica el correcto inicio de la secuencia automática, así como la validación de los permisos iniciales, correspondientes a los pasos 1 y 2 de la secuencia de control que se puede ver en la figura 48. Para ello, se restablece previamente el sistema ante cualquier condición de falla activa y se confirma el cumplimiento de todos los permisos definidos.

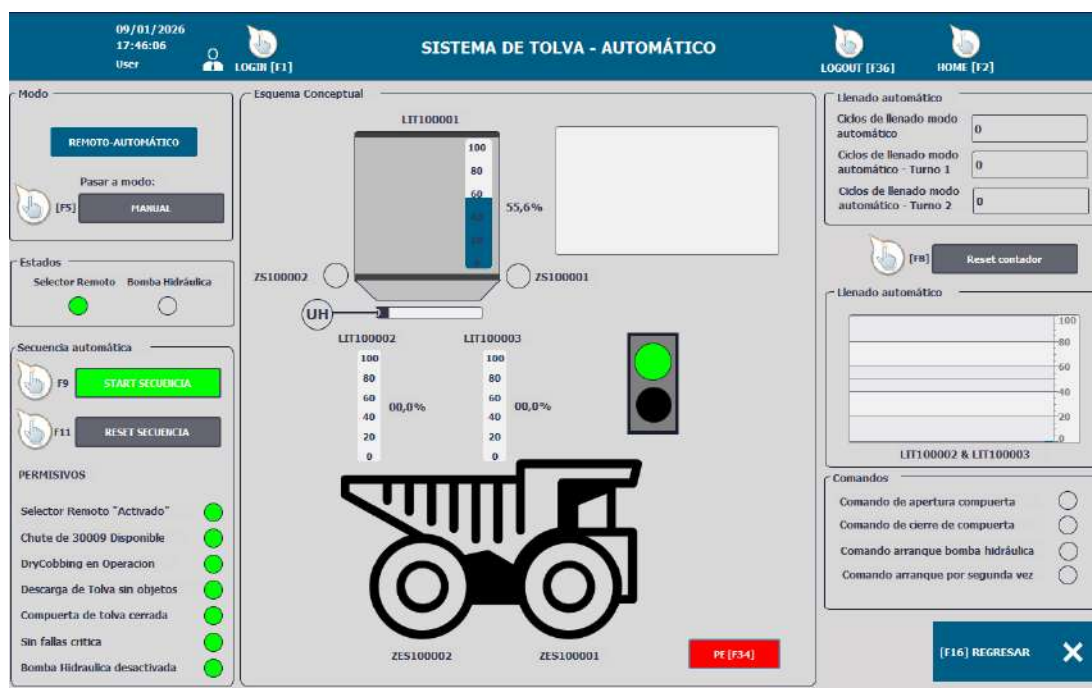


Figura 48: **Sistema listo y en espera de camión.** Fuente: Elaboración propia (2025).

Se verifica el correcto cumplimiento de las condiciones asociadas a la detección, validación y autorización del camión de acarreo, previas al inicio del proceso de llenado.

En esta fase, se comprobó el funcionamiento de los sensores ZES10001, ZES10002, LIT10001 y LIT10002, los cuales permiten analizar las dimensiones y la posición del objeto ubicado bajo la tolva, con el objetivo de discriminar si corresponde efectivamente a un camión de acarreo como muestra la figura 49. Los resultados de esta verificación permitieron confirmar o rechazar el objeto detectado, de acuerdo con los parámetros definidos en la lógica de control.

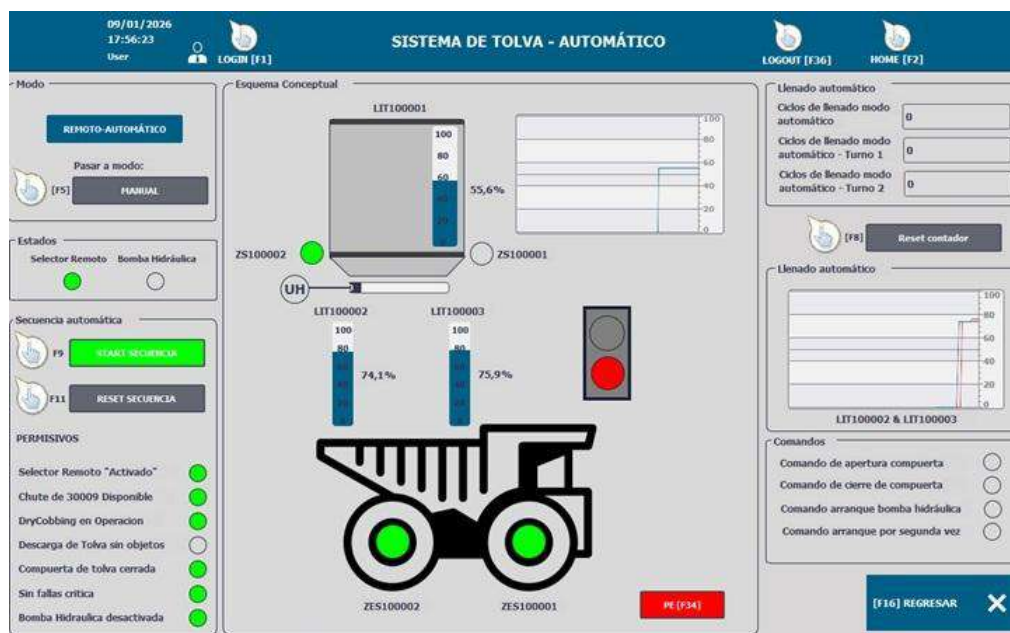


Figura 49: **Sistema detectando dimensiones correctas.** Fuente: Elaboración propia (2025).

Asimismo, al simular condiciones de posición o dimensiones incorrectas, el sistema respondió conforme a lo esperado, activando la alarma visual de posición incorrecta, lo que genera un aviso inmediato al conductor para que realice la corrección correspondiente antes de continuar con la operación, esto se muestra en la figura 50.

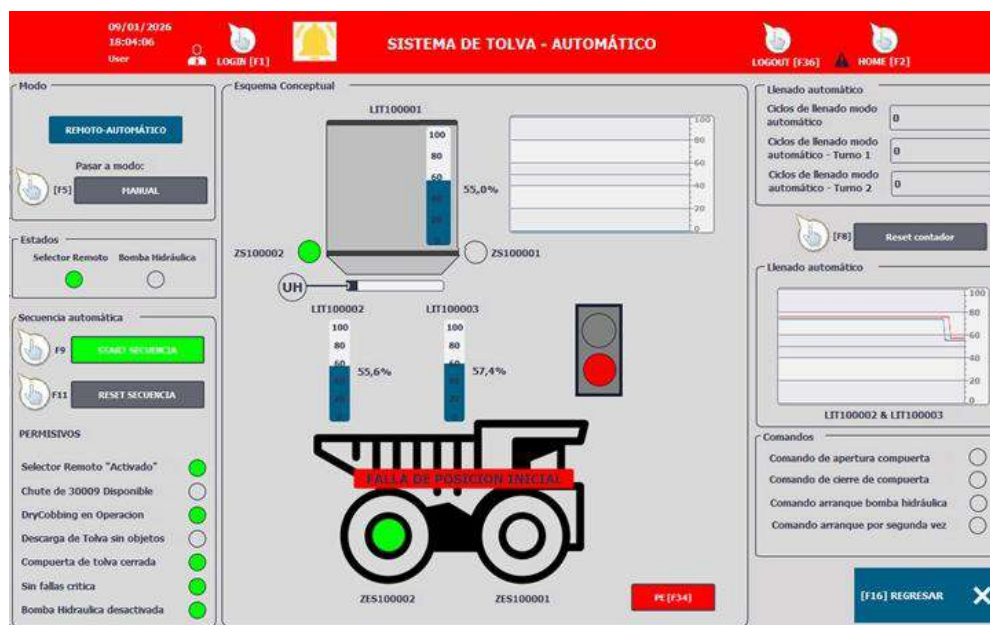


Figura 50: **Sistema detectando dimensiones incorrectas de camión.** Fuente: Elaboración propia (2025).

Finalmente, al detectarse dimensiones y posición correctas, el sistema validó exitosamente la presencia de un camión de acarreo, otorgando la autorización para el inicio del proceso de llenado y permitiendo la continuidad normal de la secuencia automática.

Como continuación de las pruebas funcionales del sistema de llenado automático, se verificó el arranque de la bomba hidráulica (KM01A), comprobando que, al cumplirse las condiciones de la secuencia, la bomba se energiza correctamente, generando la presión hidráulica necesaria para el accionamiento de la compuerta de la tolva.

Posteriormente, se verificó la apertura de la compuerta de la tolva, una vez cumplida la temporización configurable definida en la lógica de control. Durante esta prueba se confirmó la correcta activación del pistón hidráulico y el inicio controlado de la descarga de material estéril hacia el camión de acarreo.

Durante el proceso de descarga, se realizaron pruebas de llenado automático del camión, supervisando de manera continua las lecturas de los transmisores de nivel, lo que permitió comprobar el adecuado monitoreo del nivel de sólidos y el correcto control del proceso de llenado en tiempo real.

Finalmente, se verificó la detección del nivel óptimo de llenado, simulando y confirmando la condición de nivel mayor o igual al 90 % de la capacidad del camión. Ante esta condición, el sistema respondió conforme a lo esperado, ejecutando el cierre automático de la compuerta de la tolva y deteniendo la descarga de material, la figura 51 muestra la pantalla de operación después de un llenado exitoso. Estas pruebas se hicieron en compañía del área de mantenimiento y de los encargados del proyecto por parte de la mina.

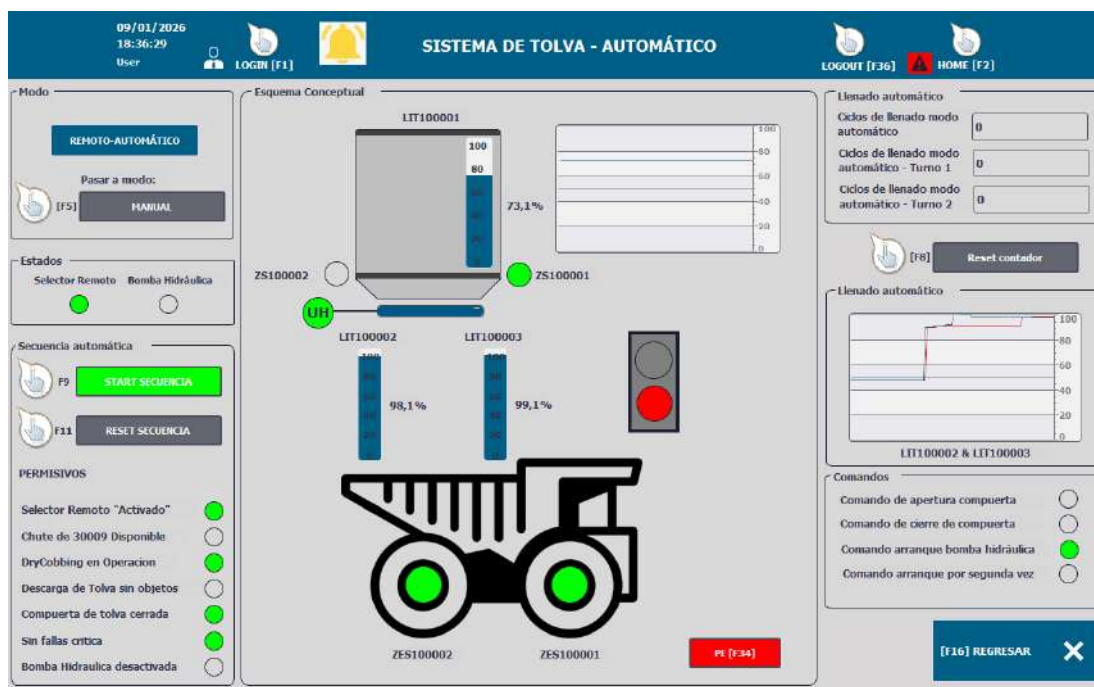


Figura 51: **Sistema después de un llenado.** Fuente: Elaboración propia (2025).

Como parte final de las pruebas funcionales del sistema de llenado automático, se verificó la confirmación del cierre de la compuerta de la tolva mediante el sensor inductivo ZS10002, comprobándose que el sistema identifica correctamente la condición de compuerta completamente cerrada, garantizando un estado seguro previo a la salida del camión de acarreo.

Una vez confirmada esta condición, se verificó la correcta activación de los avisos de salida al conductor, mediante señales audibles (bocina) y visuales (semáforo), las cuales indican de manera clara que el proceso de llenado ha concluido y que el camión puede abandonar la posición de carga.

Posteriormente, se realizaron pruebas para confirmar el retiro del camión, verificando a través de los sensores de presencia que el área ubicada bajo la tolva quede completamente despejada. Esta condición es validada por el sistema antes de permitir el reinicio del ciclo automático.

Asimismo, se comprobó el correcto conteo de camiones llenados. Finalmente, se verificó el retorno del sistema a su estado inicial, confirmando que, una vez

despejada el área y finalizado el ciclo, el sistema vuelve automáticamente a un estado de espera de camión, quedando listo para la ejecución de un nuevo ciclo de llenado automático.

4.1.4.3 Pruebas de integración con el sistema existente

Durante la etapa de pruebas de integración del sistema, se realizó la comparación y verificación de los valores de proceso visualizados en las pantallas del sistema SCADA y en los HMI instalados en las diferentes áreas, con el objetivo de asegurar la consistencia y coincidencia de la información proveniente del PLC del sistema de llenado de camiones. Esta actividad permitió confirmar la correcta comunicación e integración entre el controlador, las interfaces HMIs y el sistema SCADA existente.

Se verificaron los comandos ejecutados desde los HMIs hacia el sistema SCADA existente, validando la coherencia de estados, variables de proceso y órdenes de control entre ambos niveles de supervisión. Estas pruebas se realizaron utilizando la pantalla mostrada en la Figura 52, correspondiente al sistema de separación en seco, lo que permitió comparar en tiempo real el accionamiento de los equipos y los valores de proceso visualizados en ambos sistemas.

Se verificaron los comandos ejecutados desde el SCADA existente hacia los HMIs, verificando el control remoto de los equipos asociados al proceso. Durante estas pruebas, se comprobó el correcto accionamiento de todos los equipos vinculados al PLC del área 100.

Una vez confirmada la correspondencia de valores y estados, se procedió a ejecutar las pruebas del sistema de llenado automático de camiones y el control del proceso de separación en seco desde el SCADA existente, verificando el control remoto de los equipos asociados al proceso. Estas pruebas permitieron validar la integración funcional completa del sistema.



Figura 52: **Pantalla de sistema de separación en seco en el SCADA de chancado primario.** Fuente: Elaboración propia (2025).

Cabe precisar que la configuración y el desarrollo gráfico de los nuevos sistemas implementados en el SCADA existente del chancado primario fueron realizados por el personal de la compañía minera, haciendo uso de las señales previamente integradas y dejadas operativas como parte del presente proyecto. En tal sentido, el diseño de las interfaces gráficas del sistema SCADA no forma parte del alcance de este trabajo, siendo responsabilidad del área correspondiente de la operación minera.

4.1.4.4 Ajustes y calibraciones

Gracias a que se instaló una memoria SD en la pantalla HMI del área 400 para el almacenamiento de datos operativos del proceso de llenado, en base a estos datos se pudieron hacer ajustes importantes.

- Ajuste del ángulo de instalación de los transmisores de nivel LIT10001 y LIT10002, con la finalidad de eliminar ecos falsos y evitar pérdidas de señal durante el proceso de llenado.

- Ajuste del nivel llenado de camiones, ajuste de nivel mínimo para empezar el llenado.
- Reubicación y ajuste de la posición de los sensores de presencia ZES10001 y ZES10002, con el objetivo de evitar lecturas falsas asociadas al posicionamiento del camión bajo la tolva.
- Ajuste del nivel de intensidad de señal de los sensores ZES10001 y ZES10002, debido a que la señal inicial resultaba insuficiente para una detección estable.
- Ajuste de la posición de los sensores de compuerta ZS10001 y ZS10002, de manera que correspondan correctamente a las posiciones de cerrado (0 %) y abierto (100 %) del sensor de distancia de la compuerta
- Ajuste de la lógica de cierre de emergencia del sistema de llenado para mejorar la seguridad y continuidad operativa.

4.2 Evaluación económica

En el Cuadro 13 se presenta el resumen de los costos asociados a la implementación del sistema de automatización para el llenado de camiones pesados y el control del proceso de separación en seco (Dry Cobbing). Dichos costos comprenden la inversión inicial del proyecto, correspondiente a la adquisición de equipos, fabricación, montaje, ingeniería y puesta en marcha. Los costos de operación y mantenimiento son estimados de acuerdo con la estimación proporcionada por el cliente. Esta información constituye la base para la evaluación económica del proyecto, la cual se desarrolla mediante la elaboración del flujo de caja y el posterior análisis de los principales indicadores económicos, tales como el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR).

Cuadro 13 Cuadro de costos

Ítem	Concepto	Modelo / Referencia	Cantidad	Costo ajustado [S/]
1	Cámara IP industrial outdoor	Axis M2025-LE	2	3,696.00
2	Radio enlace industrial	Radwin 2000 Alpha ODU	8	41,580.00
3	Inyector PoE industrial	Radwin RW-9921-1022	8	3,696.00
4	Switch industrial Ethernet 16 puertos	N-Tron 716TX	4	16,170.00
5	Sensor inductivo Ø30 mm	Schneider XS230SAPAL2	2	731.50
6	Fuente de alimentación 24 VDC	Siemens SITOP PSU100L	4	1,694.00
7	PLC Siemens S7-1200 CPU	6ES7212-1AE40-0XB0	1	1,617.00
8	Módulo de entradas analógicas	SM1231	1	1,193.50
9	HMI industrial	Siemens KP1500 Comfort	3	27,142.50
10	Sensor barrera microondas (emisor)	VEGAMIP T61	2	9,625.00
11	Sensor barrera microondas (receptor)	VEGAMIP R61	2	8,470.00
12	Transmisor radar nivel sólidos	VEGAPULS 69	2	29,260.00
13	Fabricación y montaje de tableros eléctricos (IP66)	Incluye gabinete, cableado interno y pruebas	4	46,453.00
14	Materiales para canalización eléctrica	Conduit, unistrut, cajas y accesorios	—	13,772.00
15	Cables de instrumentación y control	Potencia, señal y comunicaciones	—	11,220.00
16	Montaje mecánico y eléctrico en campo	Instalación de equipos y tableros	—	16,500.00
17	Comisionamiento y puesta en marcha	Pruebas, ajustes y validación operativa	—	27,500.00
18	Ingeniería y documentación	Planos, programas PLC/HMI y manuales	—	21,500.00
TOTAL				S/ 281,820.50

Fuente: Elaboración propia

Para la estimación de los costos de mantenimiento del sistema implementado, se considera un gasto anual equivalente al 10 % del valor de la inversión inicial, criterio comúnmente utilizado en proyectos de automatización industrial para cubrir actividades de mantenimiento preventivo, correctivo menor, reposición de componentes y soporte técnico. Adicionalmente, de acuerdo con la información proporcionada por el área de mantenimiento de la compañía minera, se estima una dedicación promedio de 8 horas semanales para labores de mantenimiento del sistema. En función de estos criterios, se determina el costo anual de mantenimiento consignado en el Cuadro 15, el cual asciende aproximadamente a S/ 32,000.

Identificación de beneficios económicos

Los beneficios económicos del proyecto se originan principalmente en la reducción de costos operativos, producto de la automatización del proceso de llenado de camiones pesados y del control del sistema de separación en seco (Dry Cobbing). Al tratarse de un proyecto de automatización industrial, los beneficios no provienen de ingresos directos, sino del ahorro generado por una operación más eficiente. Antes de la implementación del sistema automatizado, la operación requería la presencia permanente de seis operadores distribuidos en las diferentes áreas del proceso. Con la automatización implementada, la operación puede realizarse de manera eficiente con tres operadores, manteniendo la supervisión del sistema desde los paneles HMI y el sistema SCADA. Considerando una jornada de dos turnos de 12 horas diarias y 365 días de operación continua al año, se obtiene el ahorro mostrado en el cuadro 14.

Cuadro 14 Cálculo de ahorro de horas hombre

Concepto	Valor
Operadores antes de la automatización (en 2 turnos)	6
Operadores después de la automatización (en 2 turnos)	3
Reducción de operadores	3
Horas por operador al año	4,380 h
Total de horas ahorradas al año	13,140 h
Costo promedio por hora	S/ 16.67
Ahorro anual por horas-hombre	S/ 219,043.80

Fuente: Elaboración propia

El Cuadro 15 presenta el flujo de caja del proyecto. En el Año 0 se considera la inversión inicial asociada a la adquisición de equipos, implementación, montaje e ingeniería del sistema. A partir del Año 1 se reflejan los ingresos generados por el ahorro en costos de personal. Asimismo, se incluyen los costos anuales de mantenimiento del sistema. Con base en estos valores se calcula la utilidad antes y después de impuestos, considerando una tasa impositiva del 18 %, obteniéndose finalmente el flujo de caja libre anual que será utilizado para la evaluación de los indicadores económicos del proyecto.

Cuadro 15 Cuadro de flujo de caja

DESCRIPCIÓN	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Inversión en equipos e implementación	- 281,820.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ingresos (ahorro por personal)	0.00	219,043.80	219,043.80	219,043.80	219,043.80	219,043.80
Costos de mantenimiento	0.00	-32,000.00	-32,000.00	-32,000.00	-32,000.00	-32,000.00
Utilidad antes de impuestos	0.00	187,043.80	187,043.80	187,043.80	187,043.80	187,043.80
Impuesto (18 %)	0.00	-33,667.88	-33,667.88	-33,667.88	-33,667.88	-33,667.88
Utilidad después de impuestos	0.00	153,375.92	153,375.92	153,375.92	153,375.92	153,375.92
Flujo de caja libre	- 281,820.50	153,375.92	153,375.92	153,375.92	153,375.92	153,375.92

Fuente: Elaboración propia

Indicadores económicos

El Valor Actual Neto (VAN) obtenido con una tasa de descuento del 12% calculado en 5 años es positivo y asciende a S/ 271,104.94, lo cual indica que el proyecto no solo recupera la inversión inicial, sino que además genera un valor económico significativo para la empresa. Por tanto, desde el punto de vista financiero, el proyecto resulta altamente rentable.

La Tasa Interna de Retorno (TIR) del proyecto es aproximadamente 44%, valor ampliamente superior a la tasa de descuento considerada (12 %). Este resultado confirma que el proyecto presenta una elevada rentabilidad financiera, recuperando la inversión inicial en un corto período de tiempo y generando utilidad, lo que hace viable la inversión.

CAPITULO V: CONCLUSIONES

- Se logró implementar con éxito el sistema automático para el proceso de llenado de camiones pesados, esto permitió reemplazar un esquema de operación manual obsoleto por un sistema controlado y supervisado, mejorando la precisión del llenado, reduciendo la intervención directa del operador y fortaleciendo las condiciones de seguridad durante la operación. La integración de sensores, lógica de control y supervisión en tiempo real permitió un proceso más confiable y alineado con los requerimientos operativos del cliente.
- Se logro implementar con éxito el sistema de control para el proceso de separación en seco que permitió la operación y supervisión de los equipos del proceso, integrando el sistema de fajas y poleas magnéticas a una plataforma de control común. Esta integración facilitó el monitoreo en tiempo real de las variables del proceso, la visualización de alarmas y enclavamientos, y la mejora de la coordinación operativa entre las áreas involucradas, contribuyendo a una operación más eficiente y segura.
- Se realizaron con éxito las pruebas funcionales, de integración, comisionamiento y puesta en marcha de ambos sistemas validando la correcta ejecución de la lógica de control, la actuación de enclavamientos y alarmas, y la comunicación entre PLC, HMI y SCADA. Los resultados obtenidos confirmaron la confiabilidad de los sistemas implementados, demostrando que cumplen con los objetivos planteados.

CAPITULO VI: RECOMENDACIONES

- Se recomienda elaborar un plan de mantenimiento para el nuevo sistema implementado, así como un plan para las calibraciones.
- Se sugiere integrar las señales futuras utilizando los mismos bloques de lógica para las entradas y salidas digitales, permitiendo una rápida incorporación de nuevos instrumentos.
- Se recomienda capacitar al personal en los sistemas implementados, incluyendo la calibración y el mantenimiento. Además, se debe revisar la lógica de control del software para que el personal se familiarice con posibles modificaciones.
- Se aconseja implementar el protocolo HART para configurar los instrumentos a distancia debido a la dificultad de acceder a ellos por su ubicación. En el caso de los transmisores de nivel situados en áreas expuestas a caídas de rocas, se recomienda realizar las configuraciones mediante Bluetooth por el momento.
- Se recomienda garantizar una fuente de alimentación estable para los gabinetes, lo que asegurará una operación correcta y evitará fallas en el sistema.

CAPITULO VII: BIBLIOGRAFÍA

Acuña, J. (1990). Automatización industrial: definición y conceptos. *Tecnología en marcha*, 10(1), 27-30.

Ángela Acosta Viñas. (2025, 18 julio). Procesos de automatización en minería: La transformación tecnológica en acción - Hub. Hub -. <https://hubinnovacionminera.pe/procesos-de-automatizacion-en-mineria-la-transformacion-tecnologica-en-accion/>

Odex. (2019, 10 Marzo). Automatización de procesos en la minería Perú. Odex. <https://www.odex.com.pe/index.php/2019/03/10/automatizacion-de-procesos-en-la-mineria-peru/>

Tómala Apolinario, M. D. (2025). Sistema automatizado de control y monitoreo para el proceso de llenado de granos mediante el uso de PLC [Tesis de pregrado]. Universidad de Guayaquil.

Quispe Huamán, J. A. (2021). Diseño de un sistema automatizado de carguío y transporte de mineral para la optimización del proceso productivo en una unidad minera [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional de Ingeniería.

Ramos Salazar, L. F. (2020). Automatización del proceso de carguío de material sólido mediante tolvas para la mejora de la eficiencia operativa en minería subterránea [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Gutiérrez, R. E. (2023). Implementación de un sistema de monitoreo y control automatizado para procesos de manejo de material sólido en minería [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

Transfer Multisort Elektronik. (2025). Controlador lógico programable (PLC) – definición y aplicaciones en automatización industrial.

Robotnik. (2025). ¿Qué es una interfaz hombre-máquina (HMI) y sus funciones en sistemas automatizados?

Cursosaula21. (s.f.). Qué es un sistema HMI y cómo transforma la automatización industrial.

AI Automation. (2025). Role of Human Machine Interfaces in industrial automation.

CAPITULO VIII:
ANEXOS

Anexo 1: Equipos y disposición en tableros de control

Tag	Descripción	Marca	Modelo
100-CP-001	Armario compacto AE 800x1000x300 mm	Rittal	1180 500
SM01	Switch industrial administrable 16 puertos	Hirsch	7161X
PS01	Fuente alimentación 2.5A @ 24VDC	Siemens	6ES71332-1LB00
PLC01	Controlador lógico programable 57-1200, CPU 1212	Siemens	6ES7212-1AE40-0XB0
AI01	Módulo de entradas analógicas	Siemens	6ES7231-4EX02-0AB0
AO01	Módulo de comunicación Profibus-DP	Siemens	6ES7242-1EX30-0XE0
TI01	Transformador de aislamiento	Radox	TAB01000280100
Q001	Interruptor termomagnético General	Schneider	ABR74206
Q01	Interruptor termomagnético	Schneider	ABR74204
Q02	Interruptor termomagnético	Schneider	ABR74202
Q501	Tomacorriente 2P + tierra	Phoenix Contact	50-BR/SC/LA/G1
PO01/BO01	inyector PoE	Radwin	RW-9921-1022

Figura 53: Lista de equipos en tablero de control 100-CP-001. Fuente: Elaboración propia (2025).

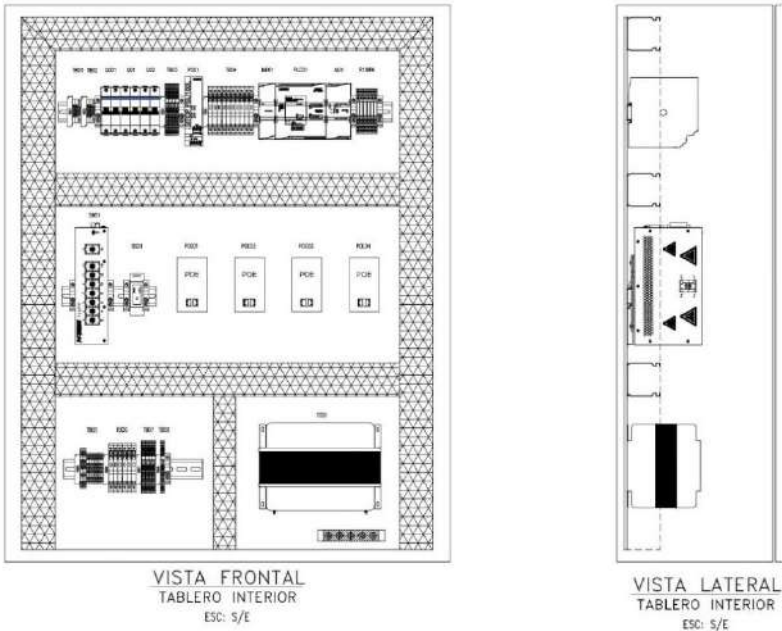


Figura 54: Disposición de equipos en tablero de control 100-CP-001. Fuente: Elaboración propia (2025).

Tag	Descripción	Marca	Modelo
200-CP-001	Armario compacto AE 600x800x250 mm	Rittal	1058.500
SW01	Switch industrial administrable 16 puertos	Mikron	7181E
PS01	Fuente alimentación 2.5k @ 24VDC	Siemens	6EP1332-1L800
HMI01	Interfase hombre - máquina	Siemens	6AW2124-1JC02-0AX1
TT01	Transformador de aislamiento	Audex	TAM010000280100
Q501	Interruptor termomagnético General	Schneider	ABF74206
Q01	Interruptor termomagnético	Schneider	ABF74202
Q02	Interruptor termomagnético	Schneider	ABF74204
O501	Termocorriente 2P + barra	Phoenix Contact	EO-AB/UT/LED/15
POE01/02	inyector PoE	Ruckus	RW-9921-1022

Figura 55: Lista de equipos en tablero de control 200-CP-001. Fuente: Elaboración propia (2025).

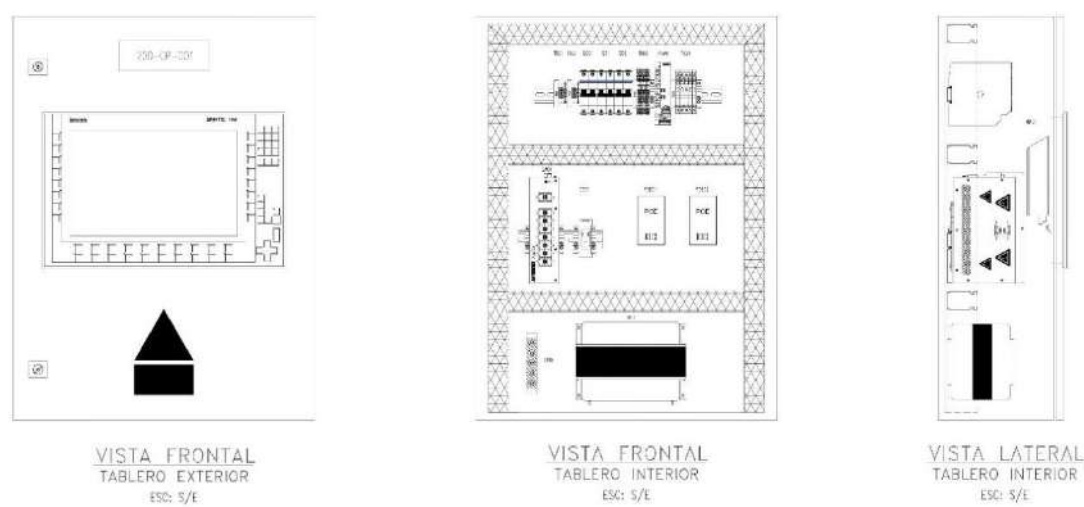


Figura 56: Disposición de equipos en tablero de control 200-CP-001. Fuente: Elaboración propia (2025).

Tag	Descripción	Marca	Modelo
300-CP-001	Armario compacto AE 600x800x250 mm	Rittal	1058.500
SW01	Switch industrial administrable 16 puertos	Mikron	7181E
PS01	Fuente alimentación 2.5k @ 24VDC	Siemens	6EP1332-1L800
HMI01	Interfase hombre - máquina	Siemens	6AW2124-1JC02-0AX1
TT01	Transformador de aislamiento	Audex	TAM010000280100
Q001	Interruptor termomagnético General	Schneider	ABF74206
Q01	Interruptor termomagnético	Schneider	ABF74202
Q02	Interruptor termomagnético	Schneider	ABF74204
O501	Termocorriente 2P + barra	Phoenix Contact	EO-BR/SC/UA/01
POE01/02	inyector PoE	Ruckus	RW-9921-1022

Figura 57: Lista de equipos en tablero de control 300-CP-001. Fuente: Elaboración propia (2025).

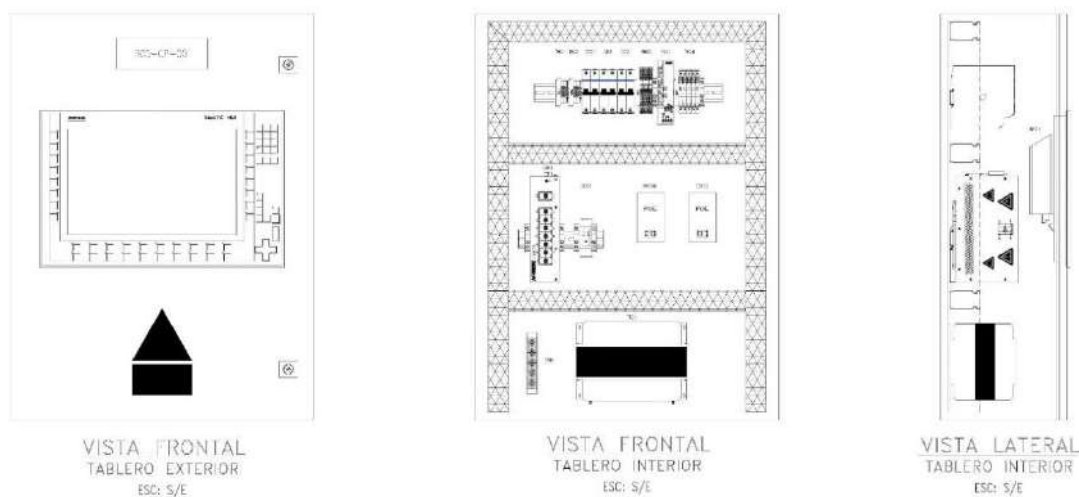


Figura 58: **Disposición de equipos en tablero de control 300-CP-001.**
Fuente: Elaboración propia (2025).

Tog	Descripción	Marca	Modelo
400-CP-001	Armario compacto AE 600x500x250 mm	Rittal	1058300
SM01	Switch industrial administrable 16 puertos	Ntiron	7100X
PS01	Fuente alimentación 2.5A @ 24VDC	Siemens	6ES7153-1B000
HM01	Interfaz hombre - máquina	Siemens	6ES7124-1G002-9AK1
TD01	Transformador de aislamiento	Audex	3AM010000200100
Q001	Interruptor termomagnético General	Schneider	MB7K305
Q01	Interruptor termomagnético	Schneider	MB7K304
Q02	Interruptor termomagnético	Schneider	MB7K302
OS01	Termocontacto 3P + tierra	Phoenix Contact	50-88/50/1A/DY
POEM/02	Inspector PoE	Radwin	PN-9921-1002
NVR01	Grabador de video	Hikvision	DS-7104N-E1/4P
TD01	Terminal	Rittal	31100000

Figura 59: **Lista de equipos en tablero de control 400-CP-001.** Fuente:
Elaboración propia (2025).

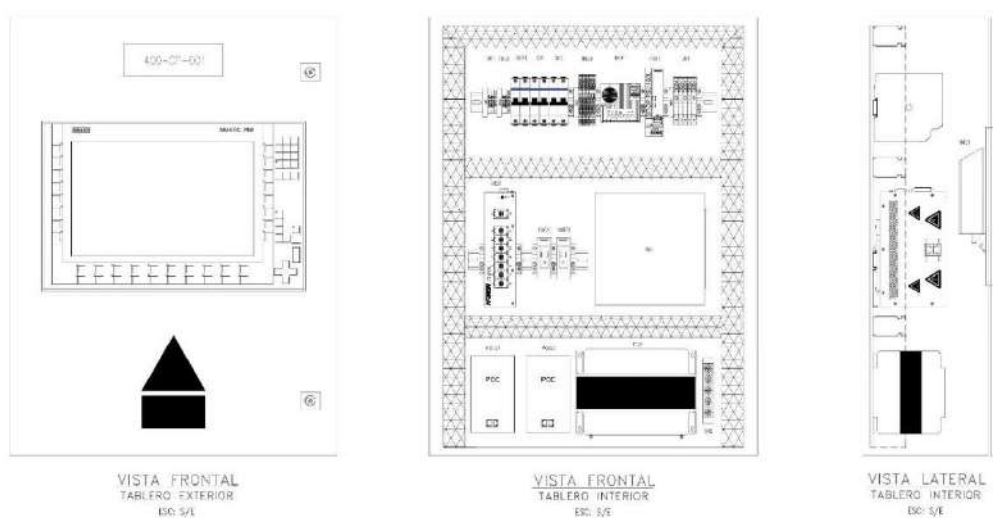


Figura 60: **Disposición de equipos en tablero de control 400-CP-001.**
Fuente: Elaboración propia (2025).

Anexo 2: Típico de montaje de equipos en el área 100-Tolva de material estéril

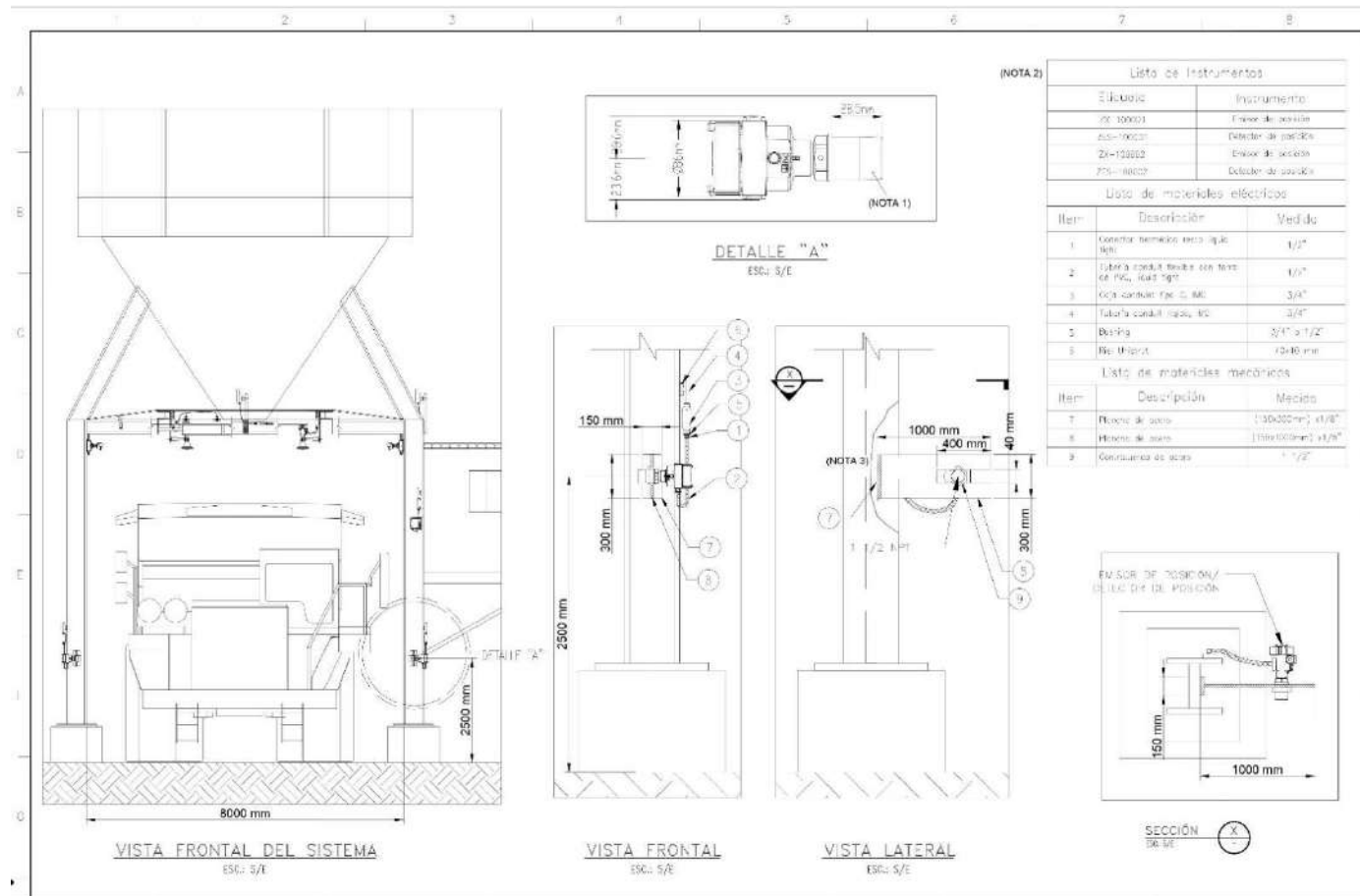


Figura 61: Típico de montaje de instrumento ZES-10001 y ZX-10001. Fuente: Elaboración propia (2025).

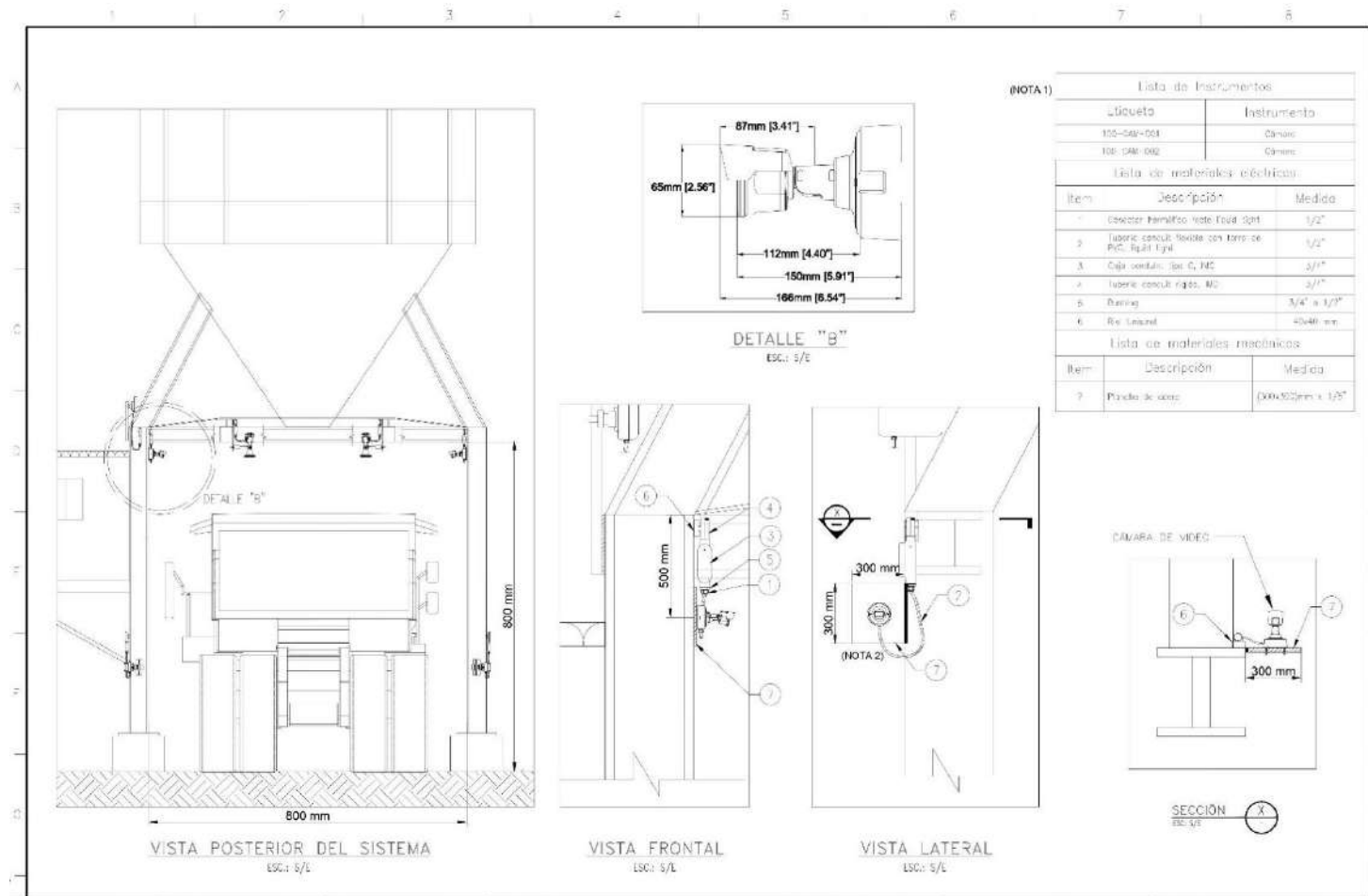


Figura 62: Típico de montaje de cámara de video 100-CAM-001. Fuente: Elaboración propia (2025).

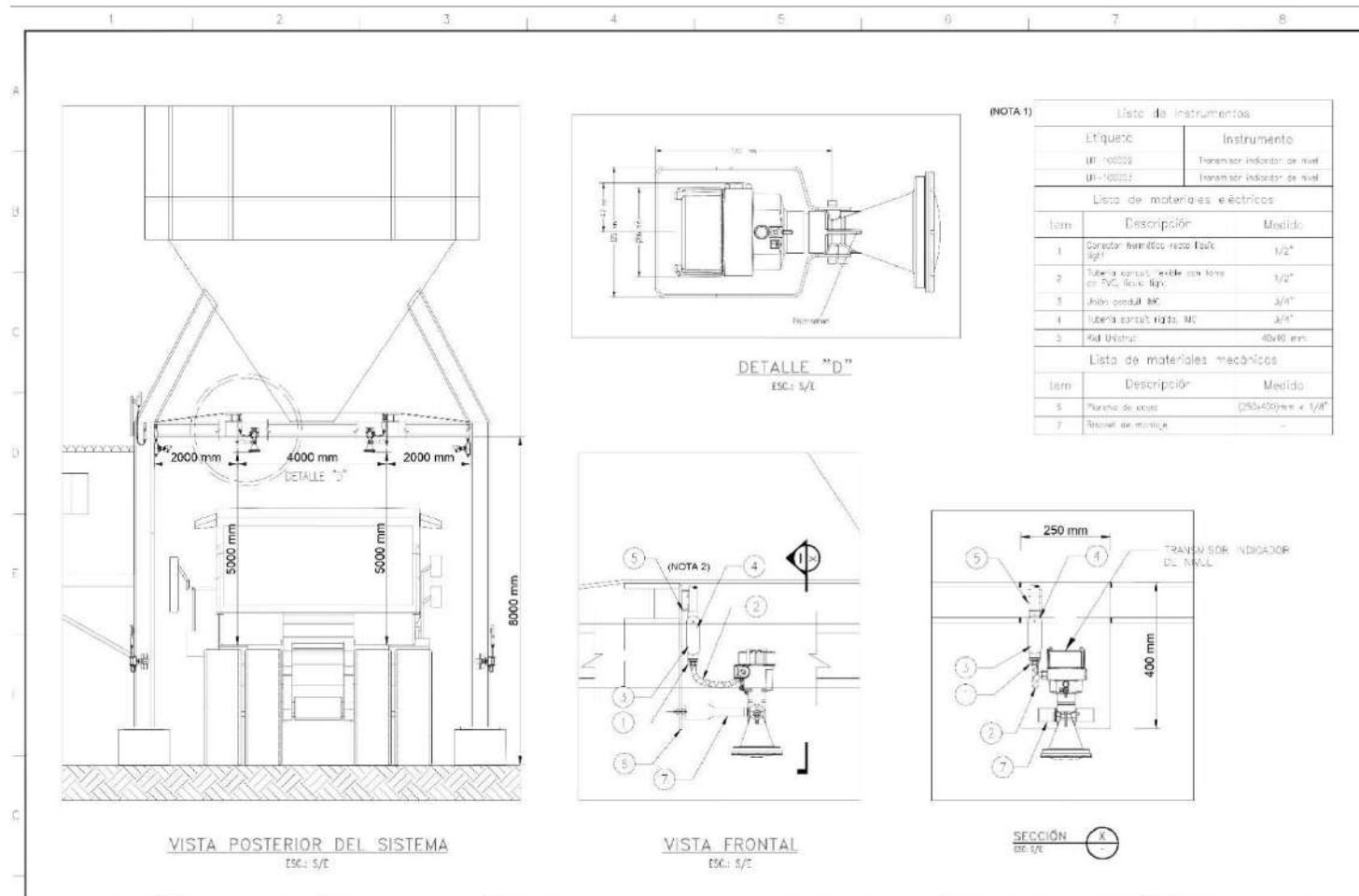


Figura 63: Típico de montaje de instrumento LIT-10001. Fuente: Elaboración propia (2025).

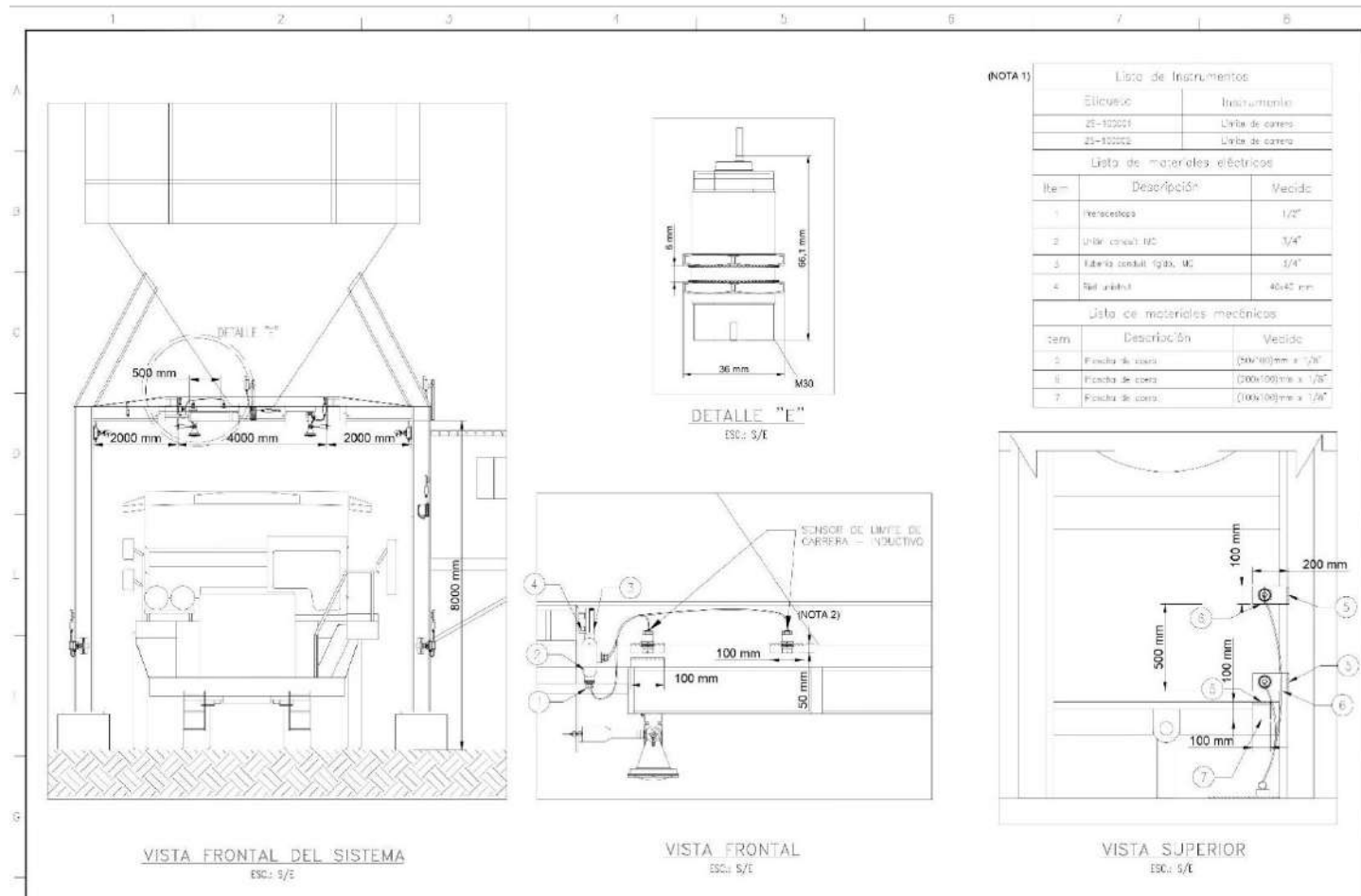


Figura 64: Típico de montaje de sensores de posición inductivos ZS-10001 y ZS-10002. Fuente: Elaboración propia (2025).

Anexo 3: Código SCL de la secuencia de llena automático

```

0001  (*)
0002  =====
0003  SECUENCIA AUTOMÁTICA DE LLENADO DE CAMIONES - SCL
0004  PLC10001 - Sistema de Tolva
0005  =====
0006  index_sa : Secuencia principal
0007  PROC_LLENADO : Sub-secuencia mecánica de compuerta
0008  =====
0009  *)
0010
0011  (*)
0012  =====
0013  CÁLCULO DE INTERLOCK GENERAL Y NIVEL PROMEDIO
0014  =====
0015  *)
0016
0017  "INTLK_GEN" := ("LIT10002_FAULT" AND "LIT10003_FAULT")
0018  OR NOT ("LIT10001_FAULT");
0019
0020  // Promedio / respaldo de transmisores de nivel del camión
0021  IF NOT ("LIT10002_FAULT") AND NOT ("LIT10003_FAULT") THEN
0022    "LIT100023_TI" := ("LIT10002" + "LIT10003") / 2;
0023  ELSIF "LIT10002_FAULT" THEN
0024    "LIT100023_TI" := "LIT10003";
0025  ELSIF "LIT10003_FAULT" THEN
0026    "LIT100023_TI" := "LIT10002";
0027  END_IF;
0028
0029  (*)
0030  =====
0031  MÁQUINA DE ESTADOS PRINCIPAL
0032  =====
0033  *)
0034
0035  CASE "index_sa" OF
0036

```

Figura 65: Código en lenguaje SCL de la secuencia de llenado automático Parte 1. Fuente: Elaboración propia (2025).

```

0037 //-----
0038 // PASO 0 - SISTEMA FUERA DE SERVICIO
0039 //-----
0040 0:
0041   "PERM_SA" :=
0042   "DRY_COBB_ON" AND
0043   "FAJA_3009_ON" AND
0044   "HS01A_ON" AND
0045   NOT "ZES10001" AND
0046   NOT "ZES10002" AND
0047   NOT "ZS10001" AND
0048   NOT "ZS10002" AND
0049   NOT "KM01A_ON" AND
0050   NOT "INTLK_GEN" AND
0051   NOT "UL10001" AND
0052   NOT "UL10002";
0053
0054   IF "PERM_SA" THEN
0055     "ENABLE_START_SA" := TRUE;
0056     IF "BUTTON_START" THEN
0057       "index_sa" := 1;
0058     END_IF;
0059   ELSE
0060     "ENABLE_START_SA" := FALSE;
0061   END_IF;
0062
0063 //-----
0064 // PASO 1 - VERIFICACIÓN DE CONDICIONES INICIALES
0065 //-----
0066 1:
0067   "COND_1" :=
0068   (NOT "LIT10002_FAULT" OR NOT "LIT10003_FAULT")
0069   AND NOT "LIT10001_FAULT";
0070
0071   IF ("LIT10001" > "C_LLENADO_TS") AND "COND_1" THEN
0072     "index_sa" := 2;
0073   ELSIF "INTLK_GEN" OR "BUTTON_STOP" THEN
0074     "index_sa" := 0;
0075   END_IF;
0076
0077   // Semáforo rojo intermitente
0078   "CMD_UL10002_SA" := "Clock_1Hz";
0079
0080 //-----
0081 // PASO 2 - SISTEMA LISTO / ESPERA DE CAMIÓN
0082 //-----
0083 2:
0084   "COND_2" := (NOT "LIT10002_FAULT" OR NOT "LIT10003_FAULT");
0085
0086   "Timer_ZES10001_P2".TON(
0087     IN := "ZES10001",
0088     PT := DINT_TO_TIME("C_POSICION_TI"),
0089     Q => "ZES10001_T"
0090   );
0091
0092   "Timer_ZES10002_P2".TON(
0093     IN := "ZES10002",
0094     PT := DINT_TO_TIME("C_POSICION_TI"),
0095     Q => "ZES10002_T"

```

Figura 66: Código en lenguaje SCL de la secuencia de llenado automático Parte 2. Fuente: Elaboración propia (2025).

```

0096 );
0097
0098 IF "ZES10001_T" AND "ZES10002_T"
0099     AND "COND_2"
0100     AND ("LIT100023_TI" > "C_NIVEL_CAMION") THEN
0101
0102     "index_sa" := 3;
0103     "CMD_UL10001_SA" := TRUE;    // Semáforo rojo fijo
0104
0105     ELSIF "INTLK_GEN" OR "BUTTON_STOP" THEN
0106         "index_sa" := 0;
0107     ELSE
0108         "CMD_UL10002_SA" := "Clock_1Hz";
0109     END_IF;
0110
0111     //-----
0112     // PASO 3 - LLENADO AUTOMÁTICO DEL CAMIÓN
0113     //-----
0114 3:
0115     "CMD_UL10001_SA" := TRUE;    // Semáforo rojo fijo
0116     "CMD_UL10002_SA" := FALSE;
0117
0118     // Arranque intermitente de bomba hidráulica
0119     "Timer_UH_P2".TON(
0120         IN := NOT "AUX2",
0121         PT := DINT_TO_TIME("C_ENC_UH_TI"),
0122         Q => "AUX1"
0123 );
0124
0125     "Timer_UH_P2_1".TON(
0126         IN := "AUX1",
0127         PT := DINT_TO_TIME("C_ENC_UH_TI"),
0128         Q => "AUX2"
0129 );
0130
0131     "CMD_KM01A_SA" := NOT "AUX1";
0132
0133     // Timers de falla mecánica
0134     "Timer_OPEN_FAIL".TON(
0135         IN := "CMD_KA1_SA",
0136         PT := T#5s,
0137         Q => "FAIL_OPEN"
0138 );
0139
0140     "Timer_CLOSE_FAIL".TON(
0141         IN := "CMD_KA2_SA",
0142         PT := T#5s,
0143         Q => "FAIL_CLOSE"
0144 );
0145
0146     //-----
0147     // SUB-SECUENCIA MECÁNICA DE COMPUERTA
0148     //-----
0149     CASE "PROC_LLENADO" OF
0150
0151         // PASO 8 - APERTURA DE COMPUERTA
0152     0:
0153         "CMD_KA1_SA" := TRUE;
0154         IF "ZS10001" THEN

```

Figura 67: Código en lenguaje SCL de la secuencia de llenado automático Parte 3. Fuente: Elaboración propia (2025).

```

0155         "PROC_LLENADO" := 1;
0156     ELSIF "FAIL_OPEN" THEN
0157         "PROC_LLENADO" := 3;
0158     END_IF;
0159
0160     // PASO 9 - LLENADO
0161 1:
0162     "CMD_KA1_SA" := FALSE;
0163     IF "LIT100023_TI" > "C_SET_LLENADO" THEN
0164         "PROC_LLENADO" := 2;
0165     ELSIF "INTLK_GEN" OR "BUTTON_STOP" THEN
0166         "index_sa" := 0;
0167     END_IF;
0168
0169     // PASO 10 - CIERRE DE COMPUERTA
0170 2:
0171     "CMD_KA2_SA" := TRUE;
0172     IF "ZS10002" THEN
0173         "PROC_LLENADO" := 0;
0174         "index_sa" := 4;
0175     ELSIF "FAIL_CLOSE" THEN
0176         "PROC_LLENADO" := 4;
0177     END_IF;
0178
0179     // LIBERACIÓN POR FALLA DE APERTURA
0180 3:
0181     "Timer_Lib".TON(IN := TRUE,
0182         PT := T#6s,
0183         Q => "LIB_OK");
0184
0185     IF "Timer_Lib".ET < T#3s THEN
0186         "CMD_KA2_SA" := TRUE;
0187         "CMD_KA1_SA" := FALSE;
0188     ELSE
0189         "CMD_KA1_SA" := TRUE;
0190         "CMD_KA2_SA" := FALSE;
0191     END_IF;
0192
0193     "Timer_VERIFY".TON (IN := NOT "ZS10001",
0194         PT := T#5s,
0195         Q => "VERIFY_FAIL");
0196
0197     IF "ZS10001" THEN
0198         "PROC_LLENADO" := 1;
0199         "NUM_LIB" := 0;
0200     ELSIF "VERIFY_FAIL" THEN
0201         "NUM_LIB" := "NUM_LIB" + 1;
0202         IF "NUM_LIB" >= 3 THEN
0203             "INTLK_GEN" := TRUE;
0204             "index_sa" := 0;
0205         END_IF;
0206     END_IF;
0207
0208     // LIBERACIÓN POR FALLA DE CIERRE
0209 4:
0210     "Timer_Lib".TON(IN := TRUE,
0211         PT := T#6s,
0212         Q => "LIB_OK");

```

Figura 68: Código en lenguaje SCL de la secuencia de llenado automático Parte 4. Fuente: Elaboración propia (2025).

```

0214     IF "Timer_Lib".ET < T#3s THEN
0215         "CMD_KA1_SA" := TRUE;
0216         "CMD_KA2_SA" := FALSE;
0217     ELSE
0218         "CMD_KA2_SA" := TRUE;
0219         "CMD_KA1_SA" := FALSE;
0220     END_IF;
0221
0222     "Timer_VERIFY".TON (IN := NOT "ZS10002",
0223     PT := T#5s,
0224     Q => "VERIFY_FAIL");
0225
0226     IF "ZS10002" THEN
0227         "PROC_LLENADO" := 0;
0228         "index_sa" := 4;
0229         "NUM_LIB" := 0;
0230     ELSIF "VERIFY_FAIL" THEN
0231         "NUM_LIB" := "NUM_LIB" + 1;
0232         IF "NUM_LIB" >= 3 THEN
0233             "INTLK_GEN" := TRUE;
0234             "index_sa" := 0;
0235         END_IF;
0236     END_IF;
0237
0238 END_CASE;
0239
0240 //-----
0241 // PASO 11-15 - VERIFICACIÓN DE SALIDA Y RETORNO
0242 //-----
0243 4:
0244     "CMD_KM01A_SA" := FALSE;
0245
0246     "F_ZES10001"(CLK := "ZES10001",
0247     Q => "EDGE_ZES10001");
0248     "F_ZES10002"(CLK := "ZES10002",
0249     Q => "EDGE_ZES10002");
0250
0251     IF "EDGE_ZES10001" OR "EDGE_ZES10002" THEN
0252         "COUNT_CHARGUES" := "COUNT_CHARGUES" + 1;
0253         "index_sa" := 0;
0254     END_IF;
0255
0256 END_CASE;
0257

```

Figura 69: Código en lenguaje SCL de la secuencia de llenado automático Parte 5. Fuente: Elaboración propia (2025).